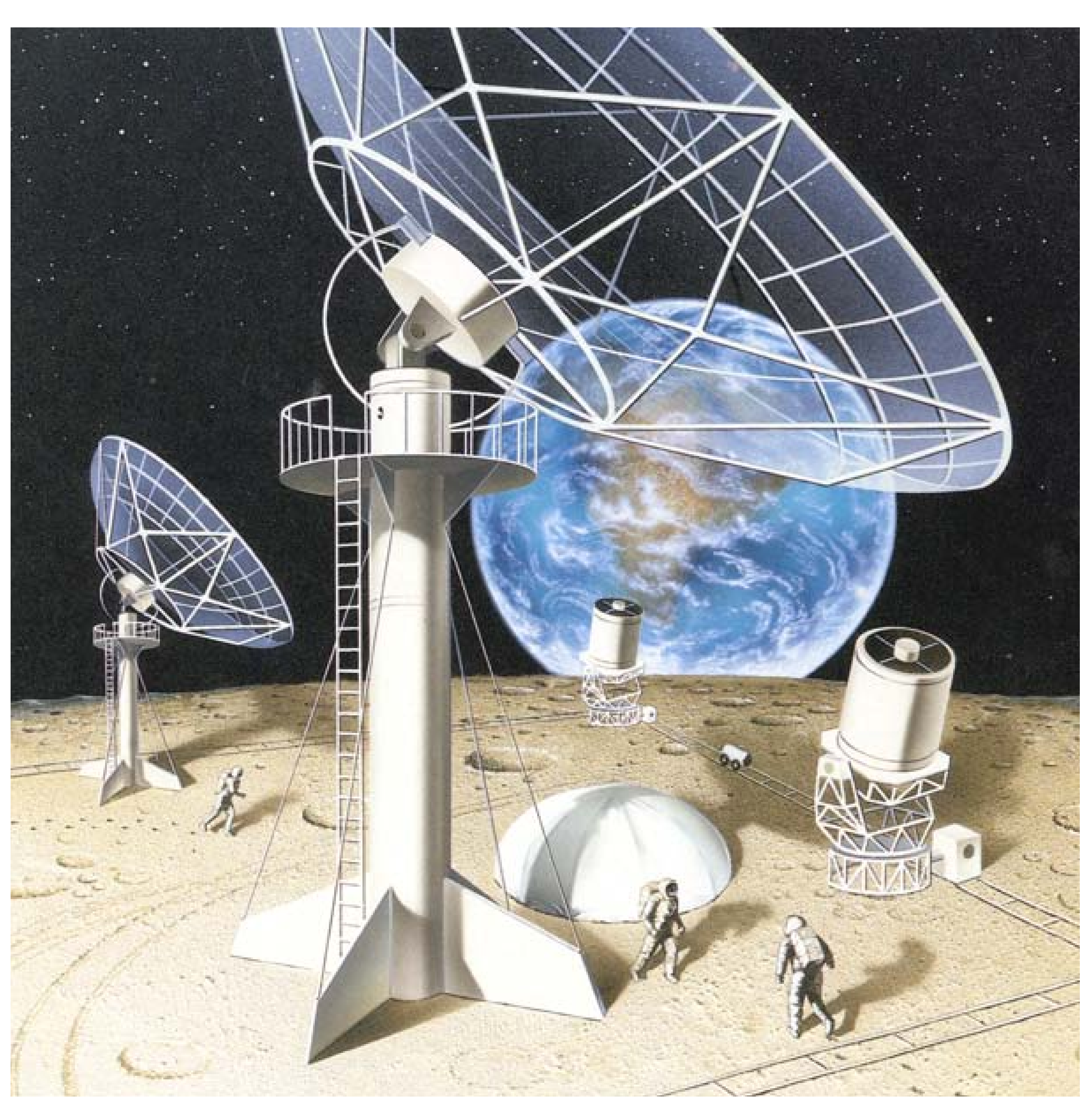
# INVESTIGACION y CIENCIA

LA PROTOHISTORIA DE LAS LENGUAS INDOEUROPEAS

NUEVAS RADIACTIVIDADES

LA INTERLEUCINA ORGANIZA EL SISTEMA INMUNE

Edición española de
SCIENTIFIC AMERICAN





OBSERVATORIOS EN LA LUNA

MAYO 1990
500 PTAS.




Mayo de 1990 Número 164

## SECCIONES

## COLABORADORES DE ESTE NUMERO

**Asesoramiento y traducción:**

José Manuel García de la Mora: *El funcionamiento del inconsciente* y *La protohistoria de las lenguas indoeuropeas*; Santiago Torres: *Interleucina-2*; León Garzón: *Nuevas radiactividades*; Dolores Muñoz y Julián Téllez: *Terremotos en la corteza continental estable*; Luis Bou: *Hacia la aldea planetaria*, *Juegos matemáticos* y *Juegos de ordenador*; Joan-Domènec Ros: *Vertebrados suspensívoros*; J. Vilardell: *Taller y laboratorio*.

**Ciencia y sociedad:**

Esther Boix y Manuel Puigcerver

**Ciencia y empresa:**

Manuel Puigcerver

**Libros:**

Agustín Albarracín, Claudi Mans, Pilar Sesma, Agustín Udías y Luis Alonso

## PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

| Página | Fuente |
|---|---|
| 6-10 | Patricia J. Wynne y Johnny Johnson |
| 11 | Johnny Johnson |
| 15-21 | George Retseck |
| 24-26 | Hank Iken |
| 28-29 | Michael Goodman |
| 30 | Walter Greiner |
| 41-42 | Joe Lertola |
| 43 | The Bettmann Archive (*arriba*), *Huxley in Hollywood*, Harper & Row, Publishers, Inc., © 1989 (*centro*) Wayne Miller, Magnum Photos, Inc. (*abajo*) |
| 44 | Joe Lertola y Edward Bell |
| 45 | Manuel Gamella |
| 46 | Jon Brenneis |
| 48 | AT&T (*arriba*), Quesada/Burke (*abajo*) |
| 49 | AT&T |
| 50 | Joe Lertola y Edward Bell |
| 55 | J. Roger Bowman, Universidad Nacional de Australia |
| 56-57 | Ian Worpole |
| 58 | Ian Worpole (*arriba*), Arch C. Johnston (*abajo*) |
| 59 | Ian Worpole |
| 60-61 | Edward Bell (*arriba*), Ian Worpole (*abajo*) |
| 62 | Robert Gelinas y David Amick, Ebasco Service |
| 65-69 | Tom Prentiss |
| 73-78 | Antonio Aragón Minguell, Juan Luis Ramos y Fernando Rojo |
| 81-82 | Thomas C. Moore |
| 83 | Edward Bell |
| 84 | Nancy Field |
| 85 | Thomas C. Moore |
| 88-90 | Andrew Christie |
| 91 | Edward Bell |
| 93 | Documents PLS |
| 94 | Michelín (*arriba*), Documents PLS (*abajo*) |
| 95-96 | Documents PLS |
| 97 | Documents PLS (*arriba*), Michelín (*abajo*) |
| 98 | Documents PLS |



LA PORTADA ilustra una vista imaginaria de un observatorio astronómico instalado en la Luna, lugar casi ideal para examinar el universo (véase "Estaciones en la Luna", en "Ciencia y sociedad" de este mismo número). La azulada Tierra parece flotar sobre una escena dominada por dos grandes radiotelescopios enlazados; a la derecha hay dos telescopios ópticos de 1,5 metros, parte de un conjunto de alta resolución. La cúpula del centro protege a los instrumentos sensibles del impacto de finas partículas.


**INVESTIGACION Y CIENCIA**

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
DIRECTOR EDITORIAL José María Valderas Gallardo
DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal Garfella
PRODUCCIÓN César Redondo Zayas
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Viladomat, 291 6º 1ª - 08029 Barcelona (ESPAÑA)
Teléfonos 321 81 91 - 321 83 48 Telefax 419 47 82

**SCIENTIFIC AMERICAN**

EDITOR Jonathan Piel
BOARD OF EDITORS Armand Schwab, Jr., *Managing Editor*; Timothy Appenzeller, Laurie Burnham, *Associate Editors*; Timothy M. Beardsley; Elizabeth Corcoran; John Horgan; June Kinoshita; Philip Morrison, *Book Editor*; John Rennie; Philip E. Ros; Ricki L. Rusting; Russell Ruthen, Paul Wallich; Karen Wright
PUBLISHER John J. Moeling, Jr.
ADVERTISING DIRECTOR Robert F. Gregory
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Claus-Gerhard Firchow
CHAIRMAN OF THE BOARD Georg-Dieter von Holtzbrinck
CHAIRMAN EMERITUS Gerard Piel

**SUSCRIPCIONES**

Prensa Científica S. A.
Viladomat, 291 6º 1ª
08029 Barcelona (España)
Teléfonos 321 81 91 - 321 83 48

**Precios de suscripción, en pesetas:**

| | Un año | Dos años |
|---|---|---|
| España | 5500 | 10.000 |
| Extranjero | 6200 | 11.500 |

**Ejemplares sueltos:**

Ordinario: 500 pesetas
Extraordinario: 650 pesetas

– Todos los precios indicados incluyen el IVA, cuando es aplicable.
– En Canarias, Ceuta y Melilla los precios incluyen el transporte aéreo.
– El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

**DISTRIBUCION**

**para España:**

MIDESA
Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel.652 42 00

**para los restantes países:**

Prensa Científica, S. A.
Viladomat, 291 6º 1ª - 08029 Barcelona
Teléfonos 321 81 91 - 321 83 48

**PUBLICIDAD**

Madrid: Gustavo Martínez Ovín
Menorca, 8, bajo, centro, izquierda.
28009 Madrid
Teléfonos 409 70 45 - 409 70 46

Cataluña: Marcel Klein
M. K. Publicidad
Ortigosa, 14-16, 3.º, D. 20
08003 Barcelona
Tels. 302 45 05 - Fax 412 52 75





ISSN 0210-136X Dep. legal: B. 38.999-76

Fotocomposición: Tecfa. Línea Fotocomposición, S.A. Almogàvers, 189 - 08018 Barcelona
Fotocromos reproducidos por Tecfa, S.A. Almogàvers, 189 - 08018 Barcelona
Imprime Rotographik, S.A. Ctra. de Caldes, km 3,7 - Santa Perpètua de la Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

# Hace…

José M.ª López Piñero

## *…cuatrocientos cincuenta años*

Pedro Jimeno asistió en Padua a las lecciones anatómicas de Andrés Vesalio.

Nacido en la localidad castellonense de Onda hacia 1515, Jimeno estudió artes y quizá también medicina en la Universidad de Valencia. Su relación con Vesalio fue un acontecimiento central de su trayectoria científica, ya que a partir de entonces se convirtió en uno de sus más tempranos y fieles seguidores. De regreso en Valencia, pasó a ocupar en 1547 la cátedra de anatomía y simples, que desempeñó durante dos años. En 1549 fue nombrado titular de la cátedra de "práctica", pero al terminar el curso académico se trasladó a la Universidad de Alcalá, donde fue profesor de anatomía y colaboró además como disector en la enseñanza que impartía Francisco Valles, máxima figura de su escuela médica. En este cargo continuó hasta su fallecimiento pocos años más tarde, según el testimonio del propio Valles.

En los reducidos límites de apenas una década, Jimeno desarrolló una actividad científica de notable fertilidad. En primer lugar, convirtió la Universidad de Valencia en una de las primeras de Europa en las que se impartió enseñanza anatómica de acuerdo con las ideas de Vesalio. En su opinión, el método adecuado de la enseñanza anatómica era la disección de cadáveres humanos realizada y explicada por el mismo profesor. La exposición verbal, por el contrario, la consideraba llena de limitaciones, ya que una cuestión anatómica solía ser "ardua atque difficillima dictu, fieri longe facillima". Jimeno incorporó también otros aspectos propios de la reforma didáctica vesaliana, como la utilización en sus lecciones de un esqueleto montado y no solamente de huesos aislados, como hasta entonces era habitual.

La segunda aportación de Jimeno fue publicar el primer texto anatómico que incorporó plenamente la nueva anatomía vesaliana, enriqueciéndola además con el resultado de sus propias investigaciones. Su título es *Dialogus de re medica, compendiaria ratione, praeter quaedam alia, universam anatomem humani corporis perstringens* y apareció impreso en Valencia en 1549, cuando su autor había desempeñado ya durante dos años la cátedra de anatomía y simples. Con la excepción de un apéndice dedicado a problemas dietéticos, está consagrado a la exposición de la anatomía del cuerpo humano. Formalmente corresponde al género renacentista de los diálogos. Las cuestiones planteadas por "Gaspar, un ciudadano" son contestadas por "Andrés, un médico", obvio reconocimiento del anatomista valenciano a su maestro. El texto se ocupa sucesivamente de la anatomía general, los huesos, los músculos y, con menor detalle, del corazón y los vasos, los pulmones, los órganos de la cavidad abdominal, el cerebro y los órganos de los sentidos. El apoyo en la *Fabrica* de Vesalio es continuo. "De hecho –ha afirmado O'Malley– el *Dialogus* es un apretado resumen de esta obra con algunas frases citadas literalmente."

Jimeno, sin embargo, no se redujo a una mera asimilación de la obra de Vesalio. Entusiasta y experto cultivador de la disección de cadáveres hu-

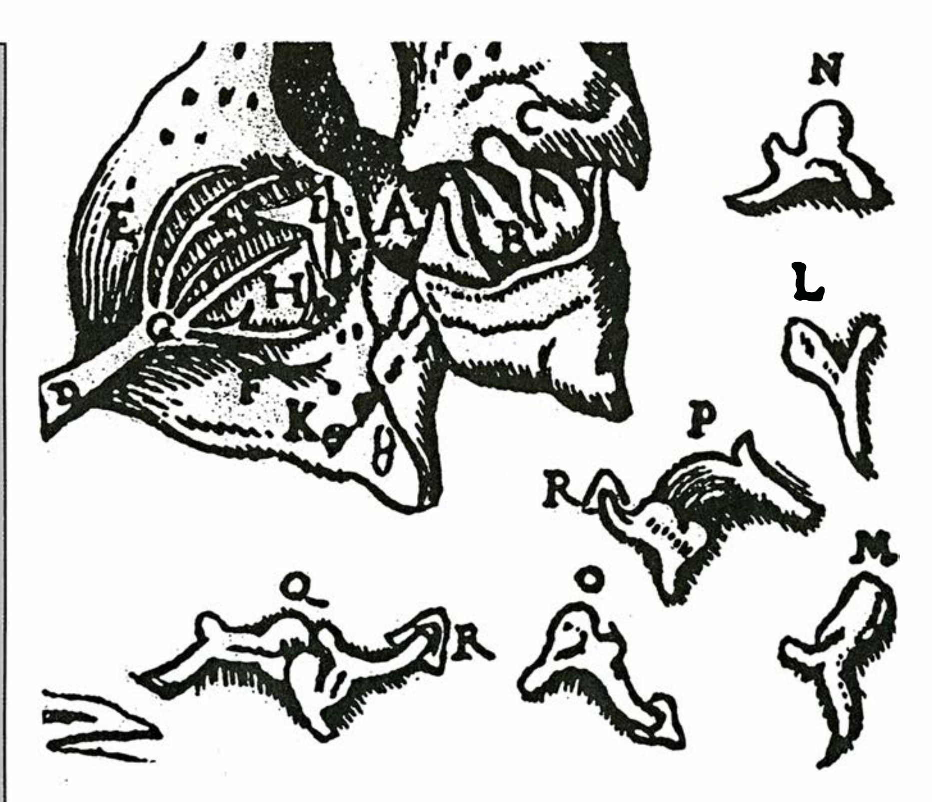
DIALOGVS
DE RE MEDICA COMPENDIARIA ratione, praeter quaedam alia, vniuersam Anatomen humani corporis perstringens, summè necessarius omnibus Medicinae canditatis.

Authore Petro Ximeno Medico professore Valentino.

Facilius reprehendes quàm imitabere.

VALENTIAE,
Per Ioannem Mey Flandrum.
1549.

*1. Portada del* Dialogus *(1549) de Pedro Jimeno. El libro se apoya directamente en la* Fabrica, *de Vesalio, incorporando también los resultados de la amplia experiencia disectiva del anatomista valenciano.*




*2. Huesecillos del oído medio. Detalle de un grabado del tratado anatómico (1556) de Juan Valverde de Amusco. El martillo y el yunque habían sido descubiertos por Vesalio; el estribo fue descrito por Pedro Jimeno.*

manos, supo utilizarla no sólo como instrumento didáctico sino como método de investigación. Pudo de esta forma descubrir el estribo, tercero de los huesecillos auriculares, del que publicó la primera descripción impresa: "En la cavidad destinada al órgano del oído hemos encontrado recientemente tres huesecillos. Dos de ellos, tras mucha observación, por mi maestro Andrés Vesalio, médico del emperador y hombre incomparable. El tercero, de poca importancia, por mí. Estos huesecillos no fueron imaginados por Galeno ni en sueños, lo que ya dije hace tiempo en nuestras disputas públicas, de acuerdo con las ideas de mi queridísimo maestro y en contra de Galeno. He encontrado el tercer huesecillo con frecuencia en los cráneos desecados que constantemente tengo ocasión de ver, y después lo he observado con cuidado en todos los que en numerosas ocasiones he disecado recientemente con este fin. Este tercer huesecillo tiene la particularidad de estar oculto en la parte interna de la cavidad del órgano del oído, frente al hueso malar y el músculo temporal; allí tiene el hueso una pequeña excavación destinada al huesecillo, en la que en cierto modo se esconde y encubre. Su forma nos parece semejante a la letra griega delta o bien a un triángulo equilátero, cuyo vértice superior, donde los dos lados se unen, se espesa un poco con una sustancia ósea muy tenue. Se forma así un acetábulo visible aunque muy pequeño, que se articula elegantemente a modo de las enartrosis con el pie algo mayor del huesecillo yunque (pues los dos primeros se parecen bastante, uno a un martillo y el otro a un yunque)".

Por otra parte, Jimeno fue consciente de la trascendencia que la nueva anatomía iba a tener para los más variados problemas médicos. Después de la descripción por Vesalio de las venas torácicas, la disputa entre los seguidores del galenismo arabizado y los partidarios del humanista en torno a la sangría en el "mal de costado" le parece, por ejemplo, definitivamente resuelta. Seguir polemizando acerca del tema es tan inútil como "tratar de la lana de las cabras o de la sombra de los asnos", afirma con una expresión del humanista Erasmo de Rotterdam, de quien era un ferviente admirador.

La tercera gran contribución del valenciano consistió precisamente en servir de catalizador del influjo de la anatomía vesaliana sobre la medicina en su conjunto. Aparte del desarrollo en este sentido de la propia escuela valenciana, el magisterio de Jimeno fue decisivo en la orientación de Francisco Valles y de Francisco Díaz, dos figuras centrales de la medicina castellana de la época.

# El funcionamiento del inconsciente

*Rigurosos estudios cuantitativos de psicoterapia están poniendo en tela de juicio algunas opiniones muy generalizadas acerca de cómo trabaja el inconsciente y progresan los pacientes sometidos a terapia*

Joseph Weiss

¿Cómo actúa la psicoterapia? Durante los últimos años, el autor y sus colegas del grupo de investigación psicoterapéutica Monte Sión, en San Francisco, han logrado dar algunas sorprendentes respuestas a esta pregunta y también a otra inseparable de ella y no menos profunda, a saber, ¿cómo funciona en realidad el inconsciente?

Supónese en general que los seres humanos no pueden ejercer inconscientemente el mismo tipo de actividades intelectuales que las que desempeñan estando conscientes, como, por ejemplo, hacer planes y calcular riesgos. Pero nuestros estudios de pacientes en curso de psicoterapia indican que se puede pensar, prever consecuencias, tomar decisiones y trazar y llevar a cabo planes, todo ello inconscientemente. Más aún, los pacientes ponen estas capacidades al servicio del restablecimiento de su salud, al servicio de la tarea de ir obteniendo control sobre sus aprehensiones, sentimientos y proceders irracionales.

La mayoría de las ideas acerca del funcionamiento consciente de la mente y acerca del proceso terapéutico han sido desarrolladas por los psicoterapeutas a partir de las impresiones clínicas, registradas en forma de notas o recordadas de memoria. Este enfoque ha sido provechoso en orden a la producción de nuevas ideas, pero no sirve para estimar su validez relativa. De ahí que el grupo de investigación psicoterapéutica de Monte Sión, que el autor codirige con su colega Harold Sampson, haya ido más allá del método clínico, prefiriendo depender de datos fiables recabados de rigurosas investigaciones cuantitativas, que se planean de antemano para verificar hipótesis concretas.

Nuestros estudios se han centrado en torno a la comparación de los méritos de dos hipótesis psicoanalíticas sobre la naturaleza del funcionamiento del inconsciente. Ambas hipótesis son evaluables, porque hacen distintas predicciones, susceptibles de verificación, acerca de cómo se comportarán los pacientes en la terapia.

La teoría del psicoanálisis supone que, ya desde los comienzos de la primera infancia, poderosos "contenidos mentales" (pensamientos y sentimientos) que no son tolerables para el yo consciente van quedando escondidos tras lo que podríamos llamar una barrera represiva, consistente en unas fuerzas que impiden a ese material reprimido alcanzar el campo de la consciencia. Sin embargo, esos contenidos así sepultados –que Sigmund Freud pensó al principio que constaban principalmente de impulsos sexuales y agresivos y que después llegó a la conclusión de que incluían también creencias, juicios y emociones tales como sentimientos de vergüenza y de culpa– siguen influyendo en el estado de ánimo y en el comportamiento. Contribuyen, por tanto, a originar los síntomas que hacen necesaria una terapia, como pueden ser una depresión inexplicable, una ansiedad difusa y todos aquellos proceders desajustados que parecen resistirse al control consciente.

Puesto que la barrera represiva limita a las personas el conocimiento consciente de por qué actúan y sienten como lo hacen, limitándoles con ello el control sobre algunas partes de su personalidad, la terapia psicoanalítica procura, ante todo, ayudar a los pacientes a aminorar sus represiones y a enfrentarse al material reprimido. El terapeuta pide a los pacientes que hagan asociaciones libres: que expresen en palabras cuantos pensamientos, imágenes, recuerdos y sentimientos les pasen por la mente. Esas asociaciones proporcionan claves para descubrir las motivaciones y los intereses inconscientes. El terapeuta puede luego interpretar las frases, señalando lo que parecen ser los subyacentes deseos, temores, creencias, sentimientos de culpabilidad y otros. Presumiblemente, las interpretaciones del terapeuta ayudarán a los pacientes a comprender cómo influye su inconsciente en sus pensamientos, sentimientos y conducta consciente.

Aunque las dos hipótesis examinadas por nosotros son compatibles con las tesis básicas de la teoría psicoanalítica, difieren mucho en sus supuestos en cuanto al grado de control que sobre el funcionamiento del inconsciente pueden ejercer los individuos. La primera hipótesis, de mayor influencia, a la que se denomina hipótesis dinámica, se deriva básicamente de los primeros escritos de Freud y da por supuesto que la gente tiene escaso o ningún control sobre su vida mental inconsciente. Propone que el inconsciente consta predominantemente de dos tipos de fuerzas: de un lado, los impulsos sexuales y agresivos buscan su satisfacción y empujan hacia la consciencia; de otro lado, las fuerzas represivas se oponen a los impulsos. Pulsiones y represiones actúan recíprocamente, de manera similar a las fuerzas del mundo físico. Por ejemplo, dos fuerzas igua-

JOSEPH WEISS da clases de psiquiatría en el hospital clínico de la Universidad de California en San Francisco y dirige (con Harold Sampson) el grupo "Monte Sión" de investigación psicoterapéutica. Se doctoró en la Universidad de Cincinnati y se especializó en psicoanálisis en el Instituto Psicoanalítico de San Francisco. En 1972 fundó, junto con Sampson, el grupo "Monte Sión".

les y opuestas pueden anularse; una fuerza intensa puede arrollar otra débil. Con sus interacciones, estas fuerzas determinan la conducta.

La otra hipótesis, que yo llamo del control inconsciente (o, para abreviar, hipótesis del control), se basa en ideas que Freud no hizo sino apuntar en algunos de sus últimos escritos. Supone que las personas pueden ejercer cierto control sobre el funcionamiento de su inconsciente. Según esta concepción, el que se mantengan reprimidos los impulsos y otros contenidos mentales no se debe a que las fuerzas represoras sean necesariamente más poderosas que las pulsiones inconscientes; antes bien, obedece a que los individuos pueden decidir inconscientemente (mediante extrapolación de vivencias pasadas y estimación de la realidad actual) que el experimentar o expresar algunos de los materiales reprimidos sería peligroso.

La hipótesis del control supone, además, que los pacientes sometidos a terapia tienen un fuerte deseo inconsciente de lograr su mejoría. Por lo cual, desean inconsciente y conscientemente sacar al exterior sus contenidos mentales reprimidos y explorar su significado. De ahí que puedan decidirse inconscientemente a alzar las barreras represoras y a permitir que salga el material oculto, cuando hacerlo así no parece peligroso.

Nosotros comparamos la hipótesis dinámica con la del control examinando las diferentes explicaciones que ofrecen de ciertos casos que suelen ocurrir en la terapia. En uno de ellos, los pacientes llegan a percatarse espontáneamente de un material inconsciente (tal como la hostilidad hacia un hermanastro) sin que el terapeuta lo haya mencionado antes.

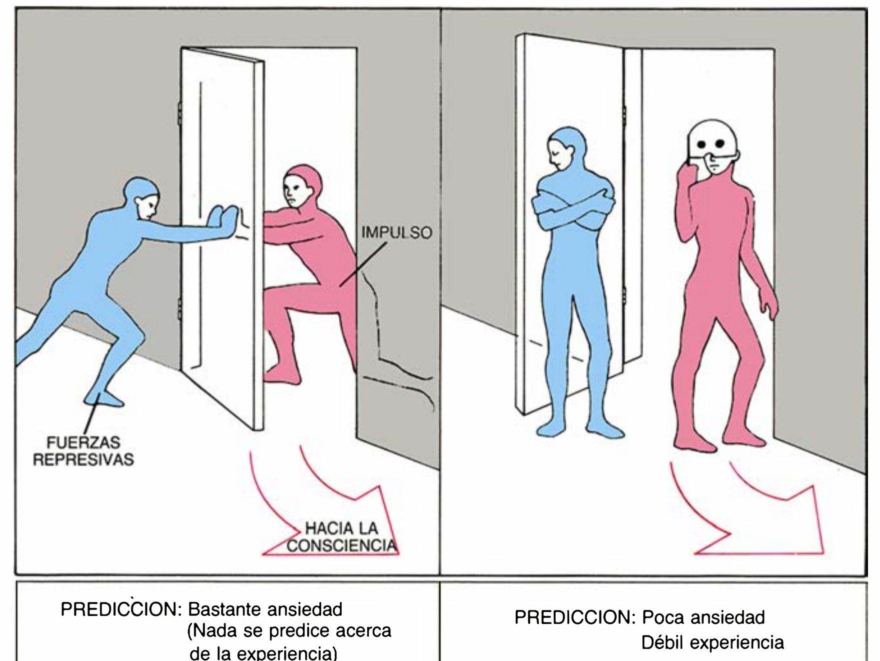
En la explicación de este fenómeno, ambas hipótesis recalcan ciertos rasgos especiales de la relación que se da entre el paciente y el terapeuta. Esta relación es profesional y confidencial y sólo tiene lugar en el consultorio; además, el terapeuta mantiene respecto a los pacientes una actitud impersonal e investigadora. Cada hipótesis se fija, empero, en un aspecto diferente de la relación.

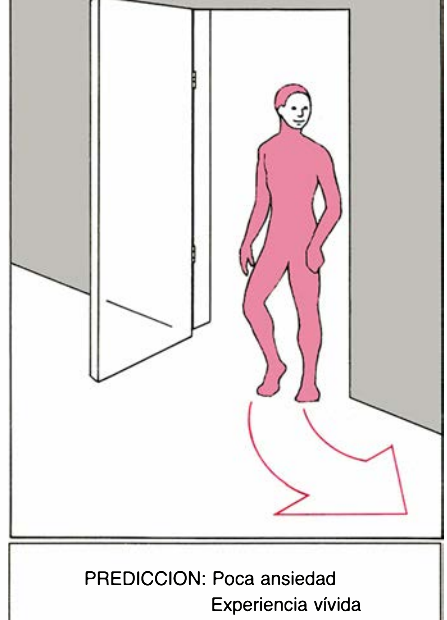
La hipótesis dinámica pone de realce las frustraciones evocadas por la actitud del terapeuta. Supone que el terapeuta se convierte, durante el tratamiento, en el objeto de las pulsiones inconscientes del paciente; por ejemplo, la reprimida hostilidad de un paciente para con un hermanastro rival puede llegar a transferirse sobre el terapeuta, de modo que el paciente se torne inconscientemente contra éste. Los impulsos inconscientes del paciente pueden quedar entonces frustrados por el impersonal despego del terapeuta e irse intensificando. Los impulsos frustrados pujan con mayor presión hacia la consciencia, pero, por la contrapresión de la barrera represora, la mayoría de las veces no llegan al campo consciente.

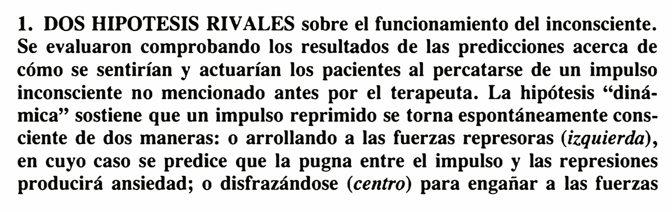
Pese al impedimento que supone esa barrera, un impulso intensificado puede hacerse espontáneamente consciente de dos modos, según la hipótesis dinámica. Uno es que el impulso llegue a ser tan poderoso frente a las fuerzas represoras que arrolle a éstas e irrumpa a través de la barrera de la represión: el paciente reacciona con rabia ante una ligera provocación del terapeuta.

El impulso frustrado e intensificado puede también entrar en la consciencia disfrazándose, de suerte que lo que llega a ser consciente es una versión mucho más suave, derivada del impulso. Como el disfraz oculta la intensidad y el ímpetu activo del impulso originario, el impulso más suave se les escapa a las usuales fuerzas represoras. Por ejemplo, la animosidad contra su terapeuta puede pasar al campo consciente bajo la forma de "absurda" y aparentemente aislada fantasía de echarle la zancadilla.

La hipótesis dinámica predice que, si un impulso emerge porque ha arro-




PREDICCION: Poca ansiedad
Experiencia vívida

**1. DOS HIPOTESIS RIVALES sobre el funcionamiento del inconsciente. Se evaluaron comprobando los resultados de las predicciones acerca de cómo se sentirían y actuarían los pacientes al percatarse de un impulso inconsciente no mencionado antes por el terapeuta. La hipótesis "dinámica" sostiene que un impulso reprimido se torna espontáneamente consciente de dos maneras: o arrollando a las fuerzas represoras (*izquierda*), en cuyo caso se predice que la pugna entre el impulso y las represiones producirá ansiedad; o disfrazándose (*centro*) para engañar a las fuerzas represoras y, esquivándolas, entrar en la consciencia, con lo que los pacientes sentirán menos ansiedad, pero experimentarán con poca viveza tal impulso. La hipótesis "del control" (*derecha*) sostiene que un impulso inconsciente suele hacerse consciente cuando los pacientes eliminan las represiones tras haber decidido en un razonamiento inconsciente que pueden experimentar sin peligro ese impulso. Se predice que, entonces, los pacientes sentirán poca ansiedad y experimentarán vívidamente el impulso no disfrazado. Los resultados corroboran la hipótesis del control.**

llado a las fuerzas represoras, entrará en conflicto con éstas al hacerse consciente; a resultas de ello, los pacientes estarán tensos y ansiosos. La hipótesis predice también que, si un impulso logra emerger por haberse disfrazado, su salida al campo consciente no producirá ansiedad. Como los pacientes suelen percatarse poco del poder del impulso original, la hipótesis predice además que no experimentarán el impulso con viveza.

Aquí debo hacer notar que la palabra "experimentar" tiene una significación específica que se basa en el empleo de un instrumento normalizado: la Escala de Experiencia. Se dice que "experimentan" con viveza un pensamiento o un sentimiento aquellos individuos que lo articulan con claridad y se concentran en la comprensión de su significado. Se considera que quienes hablan en términos vagos y con palabras que parecen separadas de sus sentimientos están experimentando débilmente un pensamiento o un sentimiento.

En contraste con la hipótesis dinámica, la hipótesis del control sostiene que, lejos de frustrar al paciente, la actitud acrítica y el compromiso de confidencialidad del terapeuta crean una atmósfera de seguridad. De ahí que los pacientes lleguen inconscientemente a la conclusión de que no tienen por qué arredrarse de sacar al campo de la consciencia cierto material reprimido. Por ejemplo, un hombre que ha reprimido continuamente impulsos hostiles por miedo a provocar represalias tal vez decida, en la terapia, que puede expresar su enfado contra el terapeuta sin arriesgarse a ningún castigo. Acaso entonces levante las barreras de la represión que se opone a la muestra de ese enojo.

La hipótesis del control postula que, como los pacientes sólo extraen su material reprimido luego de haber vencido inconscientemente su preocupación por las consecuencias, no se sentirán ansiosos al tomar consciencia del material. Y no teniendo necesidad de disfrazar sus pensamientos y sentimientos, serán capaces de afrontarlos y de reflexionar sobre ellos: los experimentarán vívidamente.

En resumen: las respectivas predicciones rivales son del todo distintas. La hipótesis dinámica predice gran ansiedad o, en el caso de un impulso disfrazado, poca ansiedad junto con una débil experiencia del material emergente. En cambio, la hipótesis del control predice escasa ansiedad junto con una vívida experiencia.

Para juzgar qué predicción es la correcta, examinamos las funciones mentales de una paciente, la señora C, durante su psiconálisis, intensiva forma de terapia en la que se acude al analista cuatro o cinco veces por semana. En el estudio de este caso, nuestra tarea básica era sencilla en su concepción: determinar los niveles de ansiedad y experiencia de la señora C en el momento en que adquiriese consciencia del material reprimido. Pero esta empresa era más fácil de enunciar que de cumplir, como lo demostrará una descripción simplificada de los cuidados y las horas de dedicación que requiere nuestro método.

En todos los estudios que nuestro equipo lleva a cabo, los datos se toman siempre de las transcripciones verbales de las cintas que, con el consentimiento del paciente, se van grabando durante las sesiones de terapia. Esas transcripciones proporcionan permanentemente datos exactos y permiten que el trabajo realizado por un grupo de investigadores lo puedan revisar y controlar otros grupos.

En este estudio concreto examinamos las transcripciones de las primeras 100 sesiones que la señora C tuvo con su analista, que era varón. Para empezar a identificar el material que a comienzos del análisis estaba reprimido y después emergió espontáneamente, se aislaron primero todos los contenidos mentales –ideas, actitudes, recuerdos y sentimientos– que fueron apareciendo en las sesiones más recientes (de la 41 a la 100), pero no aparecían aún en las anteriores. Hallamos, por ejemplo, que en una de las últimas sesiones la señora recordó haber tenido deseos de matar a su hermano, sin que ni ella ni su terapeuta hubiera hecho con anterioridad mención alguna de tal deseo.

En realidad, la señora C podría haber sido consciente de algunos de los nuevos detalles aunque no los hubiese traído a colación. Esos detalles no serían clasificables entre los que habían estado reprimidos; por tanto, debían excluirse. Para hacerlo así rogamos a unos 20 psicoanalistas, algunos de ellos en fase de entrenamiento, que actuaran de jueces. Le dimos a cada juez nuestra lista de nuevos contenidos, junto con versiones condensadas de cuanto se transcribió de las 10 primeras sesiones de análisis. A continuación, los jueces determinaron, basándose en sus propias comprensiones de los problemas de la paciente, qué materiales pensaban que habían estado reprimidos durante las 10 primeras sesiones. (Según la buena práctica científica, los jueces fueron constantemente "ciegos" a cualquier información extraña que pudiese influir en sus determinaciones.) Dichos jueces indicaron también, sobre una escala de cinco puntos, el grado de confianza que tuvieron en cada evaluación. Se aceptaron sólo como válidos los detalles que habían estado reprimidos –los que obtuvieron un promedio de confianza de 4 o 5 puntos.

Ahora se contaba ya con una nueva lista de materiales que habían estado reprimidos y después se habían vuelto conscientes. La siguiente tarea consistía en eliminar los contenidos que le hubiesen sido sugeridos a la señora C por su terapeuta. Dimos a cada uno de los jueces la nueva lista, junto con otra relación de todo cuanto había dicho el analista durante las primeras 100 sesiones. Los jueces hallaron sólo un contenido que había sido traído a colación por el terapeuta; este contenido se eliminó.

Sólo entonces fue posible medir el nivel de ansiedad de la señora C y el grado de su experiencia durante la emergencia del material previamente reprimido. Dimos transcripciones de tramos de cinco minutos, o extractos, de lo dicho por la paciente durante la terapia a dos grupos de jueces, que los evaluaron en cada una de las dos escalas ideadas para medir la ansiedad. (Se incluyeron todos los tramos que suponíamos contenían material anteriormente reprimido, entre otros muchos tramos escogidos al azar. Los jueces ignoraban esta distinción entre unos tramos y otros.) La escala de Mahl mide la ansiedad en función de la frecuencia con que se interrumpe la elocución: el mayor número de interrupciones refleja una mayor ansiedad. La escala Gottschalk-Gleser mide la ansiedad en función de la frecuencia de las referencias a ciertos tópicos: la mutilación, la vergüenza y la muerte.

Partiendo de los valores medios asignados por los jueces, sacamos la conclusión de que la señora C no estuvo más ansiosa cuando el material reprimido iba emergiendo de lo que lo estuvo en otros momentos. A decir verdad, las mediciones efectuadas con la escala de Mahl indicaban que estuvo menos ansiosa que de ordinario cuando el material reprimido se fue haciendo consciente. (Todas las observaciones de que aquí se habla son estadísticamente relevantes.)

La escala de experiencia sirvió para comprobar cuán vívidamente la señora C experimentaba los contenidos emergentes. Basándonos en un análisis de los mismos tramos que antes, averiguamos que, cuando los contenidos previamente reprimidos iban llegando al campo consciente, la señora C los experimentaba con mayor viveza que con la que experimentaba los contenidos seleccionados al azar.

El bajo nivel de ansiedad de la se-

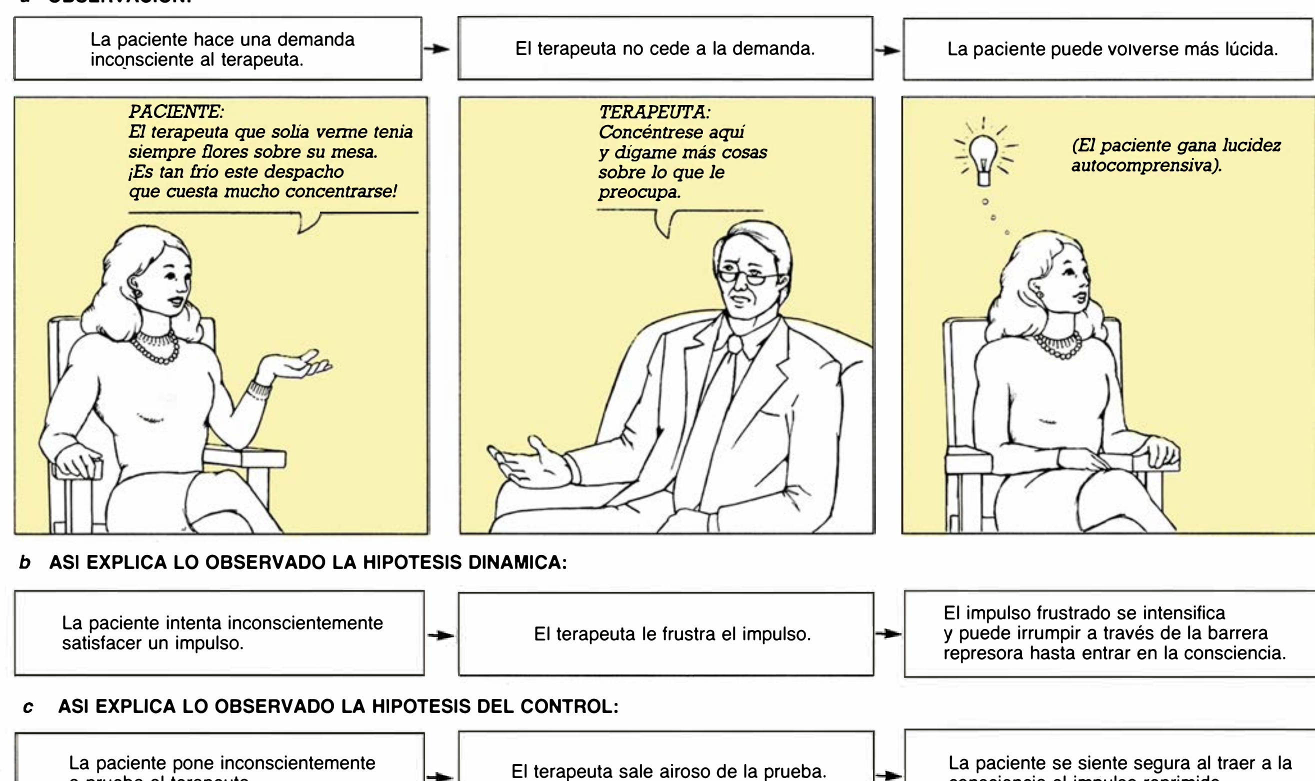
ñora C y su vívida experiencia cuadran bien con la hipótesis del control, pero no con la hipótesis dinámica. Este resultado indica que, la mayoría de las veces, los pacientes hacen salir espontáneamente el material reprimido porque el escenario terapéutico les permite sentirse seguros al hacerlo así, y no porque los impulsos reprimidos se hayan intensificado a causa de la frustración.

En otra verificación de las dos hipótesis, examinamos por qué en muchos análisis es frecuente que ocurra una determinada secuencia de eventos. En esta secuencia, un paciente hace inconscientemente objeto de una fuerte solicitud al analista. (Por ejemplo, un paciente masculino, al describir una fantasía sexual que implica a una mujer parecida a su terapeuta femenina, puede estar expresando el deseo inconsciente de tener una relación sexual con ella.) El analista, al responder, no cede a la demanda sino que reacciona de una manera que no es ni de cesión, ni de crítica o reproche, quizás interpretando la frase del paciente o formulándole una pregunta. Tras la recepción de tal réplica no concedente, ciertos pacientes comprenden mejor sus motivaciones inconscientes y progresan en el tratamiento.

La hipótesis dinámica explica la secuencia en cuestión dando por supuesto que las demandas suelen ser intentos de satisfacerse los impulsos reprimidos. Al no ceder a la demanda, el analista frustra el impulso y hace que se intensifique más. Si el impulso llega a ser lo bastante fuerte, irrumpe hasta la consciencia, atravesando la barrera represiva; si permanece reprimido, puede que, con su presión inconsciente, facilite el proceso terapéutico.

En contraste con esto, la hipótesis del control supone que los pacientes tienen a menudo una motivación distinta cuando inconscientemente hacen demandas. Recuérdese que la hipótesis del control da por supuesto que los pacientes desean, inconscientemente, llegar a tener consciencia del material reprimido. Pero temen que el expresar algunos de sus pensamientos y sentimientos reprimidos les ponga en peligro, perjudicando su

**a OBSERVACION:**




**d LOS RESULTADOS**

| CAMBIOS EN EL COMPORTAMIENTO DE LA PACIENTE | PREDICHOS POR LA HIPOTESIS DINAMICA | PREDICHOS POR LA HIPOTESIS DEL CONTROL | RESULTADOS |
|---|---|---|---|
| Cambio en la ansiedad | Aumento | Disminución | Disminución |
| Cambio en el relajamiento | Disminución | Aumento | Aumento |
| Cambio en la decisión | ——— | Aumento | Aumento |
| Cambio en el efecto | ——— | Aumento | Aumento |

**2. LA HIPOTESIS DINAMICA Y LA DEL CONTROL explican que los pacientes ganan a veces una mayor lucidez para consigo mismos tras hacer una demanda inconsciente a su psicoterapeuta (*a*); por ejemplo, una velada exigencia de disculpa. La hipótesis dinámica (*b*) supone que los pacientes hacen tales demandas por un deseo inconsciente de dar satisfacción a sus impulsos. Si el terapeuta frustra el impulso no accediendo a lo demandado, el impulso se intensifica y puede abrirse paso hasta la consciencia. (La mujer podría darse cuenta de sus deseos de molestar al terapeuta.) La predicción resultante es que, al irse percatando los pacientes de sus reprimidos impulsos, se irán poniendo más ansiosos. La hipótesis del control (*c*) supone que los pacientes hacen demandas para ver si el terapeuta aguanta sin incomodarse cuanto oiga acerca del material reprimido. Los pacientes se sentirán seguros y reconfortados una vez comprueben que el terapeuta no se incomoda, y eliminarán sus represiones; se sentirán menos ansiosos y más relajados, más resueltos y afectuosos. De nuevo, comprobando lo certero de las predicciones (*d*), resultó corroborada la hipótesis del control.**

relación con el terapeuta. De ahí que hagan demandas inconscientes, como medio de comprobar indirectamente la tolerancia del terapeuta ante tales pensamientos y sentimientos. Si los pacientes ven que el terapeuta tolera sin mayor incomodo sus demandas (o sea, que responde con holgura a sus tests), puede que ganen la sensación de seguridad necesaria para suprimir sus represiones. Por ejemplo, el hombre que inconscientemente intenta seducir a su terapeuta femenina puede sentirse tranquilo al comprobar que ella no es seducible y, además, no se ha enfadado por sus demandas sexuales; entonces quizá gane confianza en ella y llegue a hacérsele menos terrible el enfrentarse a su reprimido interés sexual por ella. (La hipótesis del control supone también que hay algunos pacientes para los que "pasar el test" implica, de hecho, que el terapeuta ceda a ciertas demandas inconscientes. Sin embargo, por mor del estudio, nos fijamos sólo en casos en los que el terapeuta pasa esa prueba sin hacer concesiones.)

¿Qué predicen las dos hipótesis en cuanto a cómo responderán los pacientes a la conducta no concesiva del terapeuta? La hipótesis dinámica predice que, tras la respuesta del terapeuta, los frustrados impulsos de los pacientes aumentarán y entrarán en conflicto con las fuerzas represivas, por lo que los pacientes se pondrán más ansiosos y estarán menos relajados. En cambio, la hipótesis del control predice que, como ciertos pacientes se sienten más seguros con la respuesta no concesiva del terapeuta, irán estando menos ansiosos y más relajados.

La hipótesis del control hace también otras predicciones sobre los pacientes que la hipótesis dinámica no hace. Predice, en efecto, que, después de pasado un test, los pacientes se sentirán más prendados del terapeuta, al que verán como amable ayuda. Y, además, sintiéndose más seguros, es probable que lleguen a cobrar valor y se atrevan a expresarse con libertad, más directamente.

Para comprobar si eran certeras estas predicciones, estudiamos una vez más los textos transcritos de las primeras 100 sesiones del análisis de la señora C. Tal como correspondía al conjunto de nuestro estudio, la paciente es una persona que pareció beneficiarse más cuando su terapeuta no accedió a las demandas de su inconsciente que cuando accedió a ellas.

Identificamos un gran número de interacciones en las que la señora C hacía una fuerte demanda inconsciente al analista. Para comparar directamente las predicciones de las dos hipótesis en competencia, redujimos después la lista de tal modo que incluyera sólo demandas que se ajustasen a los criterios de ambas hipótesis –demandas que pudieran construirse a la vez como intentos de satisfacer un impulso inconsciente y como importantes tests, asimismo inconscientes.

Esto se logró tras pedir a los jueces que creían en la hipótesis dinámica que identificasen los ejemplos en los que la señora C estaba tratando de satisfacer un importante impulso inconsciente, y de pedirles, a su vez, a los jueces que creían en la hipótesis del control que seleccionaran los momentos en que la señora C estaba proponiendo inconscientemente al analista un test importante. Luego se eligieron y entresacaron las interacciones que habían sido seleccionadas por los dos grupos de jueces: la serie de interacciones coincidentes en parte.

A continuación, examinamos lo que en esas interacciones seleccionadas pertenecía a las intervenciones o respuestas del terapeuta. Siguiendo el procedimiento anterior, pedimos a unos jueces acostumbrados a pensar en términos de la hipótesis dinámica que estimaran hasta qué punto había frustrado cada una de esas intervenciones los inconscientes impulsos de la señora C. Al mismo tiempo, se pidió a otros jueces habituados a pensar en términos de la hipótesis del control que determinasen en qué medida aquellas intervenciones habían sido buenas respuestas a los inconscientes tests de la señora C. (Para correlacionar las estimaciones hechas por los dos grupos de jueces, se comprobó que, según requería nuestra investigación, las intervenciones que un grupo de jueces veía como frustrantes de los impulsos inconscientes de la señora C fuesen las mismas que el otro grupo consideraba respuestas a los tests que ella inconscientemente había ido proponiendo.)

Acto seguido, se pidió a los jueces que evaluaran tramos de lo hablado por la señora C (antes y después de cada intervención del analista) según distintas escalas ideadas para medir la ansiedad, la relajación, el atrevimiento y los sentimientos afectuosos. Cada escala fue aplicada por un grupo de jueces diferente, y todos ellos ignoraban si el tramo por evaluar antecedía o seguía a la intervención. Los cambiantes valores asignados en cada una de esas escalas a la paciente los sometimos luego a cálculo, siguiendo un procedimiento estadístico con el que se obtiene lo que se llama una puntuación de ganancia residual.

Nuestra compilación de los datos puso de manifiesto que, cuando el analista no accedió a las inconscientes demandas de la señora C (y, por tanto, o pasó bien los tests que ella inconscientemente le propuso, o le frustró sus deseos), la paciente se volvió menos ansiosa, más valiente, más relajada y más afectuosa. Tomados en conjunto, nuestros resultados dan respaldo a la hipótesis del control. Indican que los pacientes hacen inconscientes demandas a los terapeutas como un modo de asegurarse de que pueden afrontar sin ningún peligro los pensamientos, sentimientos y recuerdos bloqueados por la represión.

¿De qué manera pueden los terapeutas ayudar mejor a los pacientes a ganar en comprensión? El autor ha desarrollado una versión de la hipótesis del control al respecto. Mi versión especifica los tipos de interpretaciones que tendrán un inmediato efecto beneficioso sobre los pacientes. Más aún, predice que tales interpretaciones contribuirán a aumentar el valor general de la terapia.

Esa hipótesis, que con mis colegas hemos sometido ya a prueba, parte del supuesto de que los problemas psicológicos se enraízan, no en reprimidos impulsos que busquen ser satisfechos por vías de inadaptación (hipótesis dinámica), sino en nocivas ideas a las que se da el nombre de creencias "patógenas". Esas inconscientes creencias irracionales son las que causan, y ayudan a mantener, la perturbación psicológica. Son factores de inadaptación, por cuanto impiden a los individuos aspirar a ciertas metas muy deseables; dichas creencias les previenen que, si tratan de alcanzar aquellas metas, se pondrán en peligro y sufrirán temores, ansiedades, sentimientos de culpabilidad o de vergüenza y remordimientos. Las creencias patógenas varían de unas personas a otras. Por ejemplo, un hombre puede sufrir porque cree que no debe pretender ser independiente, para no hacer que sus allegados se sientan rechazados e infelices; otro quizá sufra porque cree que, si trata de relacionarse sexualmente con una mujer que le atrae, será castigado.

En la psicoterapia se motiva mucho a los pacientes para que desaprueben o no acepten sus creencias patógenas, a fin de que se sientan seguros en la prosecución de esas metas contra las que sus creencias inconscientes les precaven. Los pacientes procuran desaprobar tales creencias en parte poniéndolas inconscientemente a prueba en relación al terapeuta, a veces haciendo demandas inconscientes, y otras veces de otros modos. Por ejemplo, una mujer que temía que independizándose dañaría a sus padres y

a su terapeuta masculino podría estar experimentando sobre la conducta independiente en sus sesiones de terapia, mediante el disentimiento de las opiniones del terapeuta y el controlarle luego para ver si se sentía lastimado. Por lo demás, los pacientes se sirven también de las interpretaciones hechas por el terapeuta para profundizar en la comprensión de sus creencias inconscientes y caer en la cuenta de que los peligros contra los que ellas les precaven carecen de realidad.

Como la conducta de los pacientes en tratamiento se dirige inconscientemente hacia la desaprobación de sus creencias patógenas y la prosecución de ciertas metas, puede decirse que está llena de plan. Por eso etiqueto yo como "pro-plan" aquellas interpretaciones que quepa esperar que ayuden a los pacientes a llevar a cabo sus planes inconscientes, y como "anti-plan" a las que tienden a estorbar tal progreso.

Si se quiere entender mejor el concepto de interpretaciones llenas de plan, considérese el caso hipotético de un joven que se siente culpable de desear independizarse de sus padres porque cree inconscientemente que, si debilita los lazos que le unen a ellos, sus padres quedarán destrozados. Uno de sus planes inconscientes durante la terapia consistiría en reunir pruebas contra tal creencia, a fin de que pudiera llegar a sentirse cómodo, digamos, marchándose de la casa paterna. Podría empezar a llevar adelante su plan sometiendo inconscientemente a prueba la tolerancia del terapeuta respecto a un afán de independencia. Podría discutir, por ejemplo, su imaginada aceptación de un empleo en otra ciudad. Seguramente encontraría favorable –pro-plan– la interpretación de que, si se resiste a considerar en serio tal paso, es por temor a lastimar a su terapeuta y a la familia, mientras que le parecería obstaculizadora –anti-plan– la sugerencia de que su fantasía refleja un deseo inconsciente de eludir el enfrentar su independencia a su terapeuta y a la familia.

La hipótesis del autor origina la predicción de que los pacientes reaccionarán de distinto modo a las interpretaciones pro-plan que a las irrelevantes o anti-plan. La hipótesis predice que, cuando se les ofrezca una interpretación pro-plan, los pacientes progresarán en la comprensión de sus creencias y experimentarán vívidamente sus sentimientos. En cambio, si se les ofrece una interpretación anti-plan, los pacientes se sentirán en conflicto; se volverán también menos comprensivos de su interioridad y experimentarán con menor viveza sus sentimientos.

El autor y sus colegas han comprobado lo certero de estas predicciones estudiando tres terapias psicoanalíti-

***a***




*(La meta a la que aspira llegar el paciente es la del independizarse de la terapeuta, pero en su inconsciente late la patógena creencia de que a la terapeuta le apenará perderle de vista. Y se siente culpable.)*




*(Interpretación pro-plan).*




*(El paciente se siente aliviado y acusa el beneficio.)*

***b*** **LO QUE FUE OBJETO DE ESTUDIO**




***c*** **LO QUE SE MIDIO**

LOS GRADOS DE PENETRACION AUTOCOMPRENSIVA Y DE EXPERIENCIA → LA ADAPTACION DE LA INTERPRETACION AL "PLAN" → LOS CAMBIOS EN LA COMPRENSION Y EN LA EXPERIENCIA

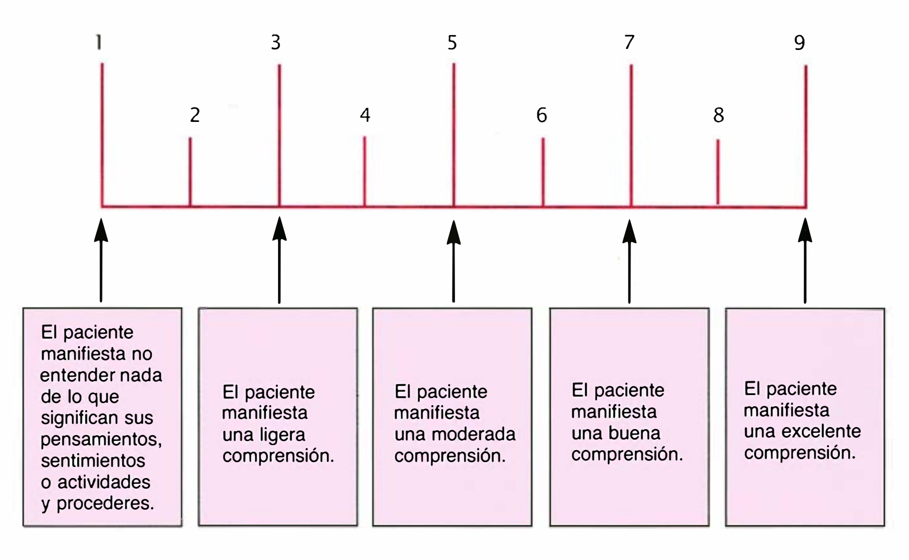
**3. INTERVENCION "PRO-PLAN" realizada por el terapeuta. Sirve para ayudar al paciente a desaprobar una creencia inconsciente (*a*). La versión que el autor da de la hipótesis del control sostiene que los pacientes abrigan en su inconsciente creencias "patógenas" que les precaven contra la aspiración a determinadas metas, amenazándoles con consecuencias terribles. En la terapia, los pacientes hacen inconscientemente planes para desaprobar esas obstaculizadoras creencias (*izquierda*). La hipótesis predice que los comentarios pro-plan efectuados por el terapeuta –aquellos que apoyan el plan (*centro*)– ayudarán a los pacientes, quienes verán aumentada su comprensión respecto a las motivaciones inconscientes y experimentarán vívidamente sus sentimientos (*derecha*). Se predice, por el contrario, que los comentarios que sean "anti-plan" –aquellos que den apoyo a las creencias patógenas– resultarán perjudiciales e irán seguidos de una mengua de la comprensión y de la experiencia. Para comprobar la hipótesis, se les dieron a unos jueces clínicos transcripciones de tramos de lo hablado por un paciente antes y después de las interpretaciones del terapeuta (*b*). Los jueces puntuaron los niveles de comprensión y de experiencia sobre una escala estándar (*c*). Otros jueces evaluaron la adaptación de las interpretaciones al "plan". Correlacionando éstas con los cambios de comprensión y de experiencia, resultaron beneficiosas las interpretaciones pro-plan.**

cas de corto plazo; cada una duró 16 semanas. Nuestros métodos para correlacionar las interpretaciones pro-plan y anti-plan con los niveles de penetración comprensiva y de experimentación fueron muy directos. Primero, hicimos que unos jueces clínicos determinaran las creencias patógenas del paciente y las metas contra las cuales aquellas creencias le precavían. Los jueces realizaron este cometido examinando las transcripciones de la entrevista (que precedía al comienzo real de la terapia) y de las dos primeras sesiones terapéuticas. Basándose en su comprensión de las transcripciones, los jueces elaboraron luego lo que a su entender eran unas interpretaciones pro-plan: aquellas que cabía esperar que ayudaran al paciente a desaprobar sus creencias patógenas.

A continuación, un segundo grupo de clínicos recibió las listas de creencias, metas e ideas de ayuda propuestas, junto con otra lista que habíamos compilado de las intervenciones efectuadas por los terapeutas, en la que constaban todos los comentarios hechos con la intención de sugerir comprensión. Basándose en estas listas, los jueces (que desconocían las respuestas del paciente) evaluaron los comentarios conforme a una escala que iba desde los fuertemente anti-plan hasta los fuertemente pro-plan.

Aún faltaba determinar cuánto cambiaban la penetración autocomprensiva y las experiencias del paciente en respuesta a las intervenciones del terapeuta. Hicimos esto aislando tramos de lo dicho por el paciente inmediatamente anteriores e inmediatamente posteriores a cada interpretación. Un grupo de jueces, que desconocían lo mismo el orden en que tuvieron lugar los comentarios del paciente que las intervenciones del terapeuta, evaluó cada tramo ateniéndose a lo que suele llamarse Escala Morgan de la Introspección del Paciente. Otro grupo de jueces evaluó los tramos con la Escala de Experiencia. Y se calcularon las puntuaciones residuales de ganancia.

Para cada paciente hallamos una fuerte correlación entre las interpretaciones pro-plan y las mejoras tanto en perspicacia autocomprensiva como en nivel de experiencia. Por ejemplo, correlacionando el nivel medio de presencia de plan en todas las interpretaciones de una determinada sesión de terapia con el valor medio del nivel de experiencia logrado por el paciente en esa sesión, resultó una correlación muy alta: 0,78 para un paciente, 0,54 para el segundo y 0,57 para el tercero. Así, pues, la investigación corroboraba mi hipótesis.




**4. ESCALA para medir hasta qué punto comprende el paciente sus pensamientos, sentimientos y maneras de actuar; se trata de uno de los muchos instrumentos mediante los cuales el autor y sus colegas cuantifican en su investigación las observaciones realizadas. Lo que aquí se muestra es sólo un esquema simplificado de la compleja Escala Morgan de Comprensión del Paciente del texto.**

¿Ayuda realmente la estrategia de hacer interpretaciones pro-plan a mejorar a largo plazo la salud mental de los pacientes, o sus efectos positivos se restringen, en la generalidad de los casos, a la sesión durante la cual se hacen las interpretaciones? Intentando averiguarlo, nos entrevistamos con los pacientes y fuimos evaluando su salud mental (mediante una batería de tests "de resultados") a los seis meses de haber concluido su tratamiento con los terapeutas.

Un paciente obtuvo muy buena puntuación, otro mediana y el tercero más bien mala; estos resultados concordaban bastante con los tipos de interpretaciones que los pacientes recibieron. Cuando calculamos la proporción de las interpretaciones que fueron pro-plan, anti-plan y ambiguas, hallamos que, en el primer caso, los porcentajes fueron 89, 2 y 9 respectivamente; en el segundo, 80, 2 y 18, y en el tercero 50, 6 y 44. Aunque para ser convincentes las pruebas deban repetirse en un gran número de casos, estos datos no dejan de sugerir que los pacientes que reciben un alto porcentaje de interpretaciones pro-plan obtienen mejores resultados. ¿Cómo actúa la psicoterapia? Demostrando que las interpretaciones pro-plan sirven de gran ayuda y que las anti-plan no, se ha corroborado la hipótesis de que los pacientes sufren de inconscientes creencias patógenas y hacen y procuran llevar a cabo inconscientemente planes para desaprobar esas creencias, con la intención de derribar los obstáculos que les impiden alcanzar sus metas conscientes e inconscientes.

¿Cómo se las arreglan los pacientes para realizar tales planes? Las pruebas recabadas cuadran bien con el supuesto de que los pacientes hacen emerger sus creencias patógenas y otros pensamientos y sentimientos inconscientes tan sólo cuando deciden que pueden hacerlo sin menoscabo de su seguridad, esto es, sin arriesgarse a peligros internos tales como el de sufrir un sentimiento de culpa o de vergüenza, o a peligros externos como el de la falta de cariño. Encontramos también pruebas de que los pacientes buscan garantías de su seguridad sometiendo inconscientemente a prueba al terapeuta.

Parece ser que las capacidades cognitivas del inconsciente se han venido subestimando y los humanos pueden desempeñar inconscientemente muchas tareas intelectuales, incluidos el desarrollo y la ejecución de planes para alcanzar determinadas metas. Las implicaciones para la terapia son obvias: los buenos terapeutas inferirán con esmero cuáles son las metas a que inconscientemente aspiran sus pacientes, y procurarán ofrecerles interpretaciones que les ayuden a progresar en su prosecución.


BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

HOW DO INTERPRETATIONS INFLUENCE THE PROCESS OF PSYCHOTHERAPY? George Silberschatz, Polly B. Fretter y John T. Curtis en *Journal of Consulting and Clinical Psychology*, vol. 54, n.º 5, págs. 646-652; octubre de 1986.

THE PSYCHOANALYTIC PROCESS: THEORY, CLINICAL OBSERVATIONS AND EMPIRICAL RESEARCH. Joseph Weiss, Harold Sampson and the Mount Zion Psychotherapy Research Group. Guilford Press, 1986.

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa

# Interleucina-2

*Primera hormona del sistema inmune en ser identificada, interviene en la organización de la defensa contra los microorganismos. Tiene por misión activar la multiplicación de las células encargadas de atacar al invasor*

Kendall A. Smith

Desde que en 1797 Edward Jenner introdujese la vacunación como método preventivo de la viruela, el sistema inmune no ha dejado de fascinar a los biólogos. Después de dos siglos de labor investigadora, de progreso lento, se sabe ya que la actividad del sistema inmune depende de la intervención sinfónica de varios tipos de células sanguíneas y tisulares altamente especializadas, cada uno de los cuales desempeña una función exclusiva. La lista de células inmunes ha ido creciendo, sin que se supiese muy bien cómo esta multitud de células inconexas lograba orquestar sus actividades en una defensa selectiva contra las enfermedades. Por ello, hasta hace muy poco tiempo, la inmunidad constituía un fenómeno misterioso y, la inmunología, una ciencia de excesiva complejidad, teñida de ribetes esotéricos incluso para los biólogos cultivadores de otras disciplinas.

Durante los últimos diez años, sin embargo, la inmunología ha sufrido una transformación, con la demostración de que el sistema inmune está regulado por hormonas, de manera parecida a como lo está la mayoría de los otros sistemas de órganos. Hoy día, la inmunología ya no es una ciencia "aparte", confinada en su vocabulario y mecanismos específicos. Por el contrario, el descubrimiento y la caracterización de las interleucinas, hormonas del sistema inmune, han dejado claro que la respuesta inmune opera según los mismos principios que gobiernan las hormonas clásicas y sus receptores.

La interleucina-2 (IL-2) fue la primera de las nuevas hormonas inmunológicas que se descubrió y caracterizó. Ahora los inmunólogos han identificado ocho interleucinas, aunque la función de algunas de ellas se desconoce, o no guarda conexión directa con la inmunidad. La IL-2, sin embargo, es fundamental para la generación de una respuesta inmune eficaz. Por ello, el conocimiento a fondo de la IL-2 y de sus receptores resulta decisivo para el desarrollo de aproximaciones terapéuticas a una amplia gama de situaciones: cáncer, enfermedades de autoinmunidad, enfermedades infecciosas crónicas, síndrome de inmunodeficiencia adquirida (SIDA) y rechazo de transplantes de órganos.

El conocimiento de la función de la IL-2 ha permitido, en buena medida, explicar las propiedades específicas del sistema inmune. De la misma manera que el sistema nervioso percibe y responde a los cambios de luz, sonido y otros estímulos ambientales, el sistema inmune detecta y responde a la invasión de moléculas en forma de microorganismos foráneos, como bacterias, virus, hongos y parásitos. Para llevar a cabo su tarea, el sistema inmune combina tres características originales. Primero, la reactividad inmune es altamente específica y extraordinariamente diversa, propiedades gracias a las cuales el cuerpo reconoce y responde a cualquier posible microbio o molécula foránea (antígeno). El sistema inmune posee también una exquisita capacidad para discriminar entre lo propio y lo ajeno, y sólo muy ocasionalmente reacciona contra los tejidos del propio cuerpo. Por último, el sistema inmune tiene memoria. Tras una primera exposición a un antígeno, y en virtud de ciertos cambios misteriosos que acontecen en el sistema inmune, puede responder antes y con especial fuerza a futuras exposiciones.

Niels K. Jerne, que recibió el premio Nobel de medicina en 1984, sentó las bases de los actuales conocimientos sobre el sistema inmune en 1955, mientras trabajaba en el Instituto de Tecnología de California. Propuso que la reactividad inmunológica se fundaba en el principio darwinista de la selección natural. Se sabía ya que las moléculas de anticuerpos de la sangre reaccionaban específicamente contra los antígenos. Jerne sugirió que todos llevamos un número inicialmente pequeño de anticuerpos contra cualquier posible antígeno. Cuando un antígeno penetra en el cuerpo, los anticuerpos que se pueden unir a él se seleccionan positivamente (según la terminología darwinista) y aumenta su número.

Cuatro años más tarde, otro laureado con el Nobel, Sir Macfarlane Burnet, del Instituto Walter y Eliza Hall de Investigaciones Médicas de Melbourne, dio a la teoría de la se-

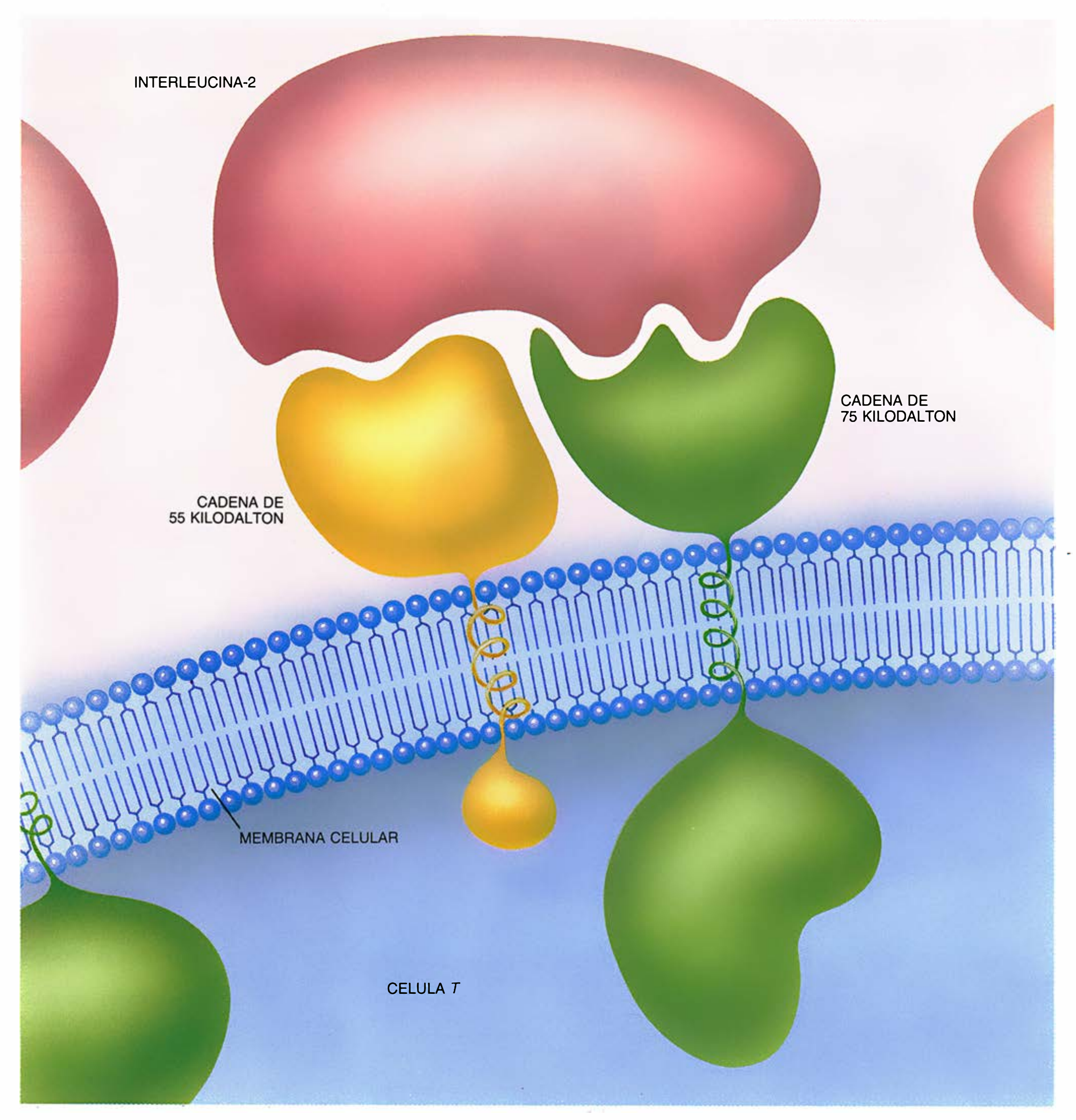
KENDALL A. SMITH es profesor en la Facultad de Medicina de Dartmouth. Obtuvo su grado "summa cum laude" en la Universidad estatal de Ohio, en 1968. Tras terminar sus prácticas en la de Yale, pasó varios años como becario postdoctoral en el Instituto Nacional del Cáncer de Dartmouth y en el Instituto de Investigaciones sobre el Cáncer e Inmunogenética de Villejuif. En Dartmouth, Smith estudió la biología estructural de la interleucina-2 y su receptor, los procesos moleculares que dan la señal para la proliferación celular, los mecanismos bioquímicos responsables de la memoria inmune y la potencial utilidad terapéutica de las interleucinas.

**1. INTERLEUCINA-2 (IL-2). Se traba a un receptor de la membrana externa de las células *T* del sistema inmune que han sido estimuladas por un antígeno. El receptor está compuesto por una cadena proteínica grande (75 kilodalton) y otra menor (55 kilodalton), cada una de las cuales se une de forma independiente a la molécula de IL-2. La interacción entre interleucina-2 y la cadena larga constituye la señal que pone en marcha la proliferación de las células *T*, intensificando de este modo el ataque específico del sistema inmune contra cualquier tipo de microorganismo.**

lección natural de Jerne una base celular, en un opúsculo titulado *Teoría de la selección clonal de la inmunidad adquirida*. En él, Burnet proponía que cada molécula de anticuerpo era producto de una sola célula. Según Burnet, el antígeno reacciona directamente con la célula productora de anticuerpo para estimular la síntesis de anticuerpo. (Esta idea fue sugerida ya en 1905 por Paul Ehrlich, pionero de la inmunología y premio Nobel también.) Implícita en la hipótesis de Burnet estaba la idea de que, tras la activación selectiva por el antígeno, la célula productora de anticuerpos prolifera hasta formar un clon, esto es, un grupo de células con un ancestro común.

Cuando Burnet avanzó su tesis, se desconocía qué células eran las que reaccionaban con los antígenos, aun cuando se sabía, con bastante certeza, que los leucocitos o células plasmáticas fabricaban grandes cantidades de anticuerpos. Los linfocitos, células predominantes en los nódulos linfáticos, eran los candidatos más indicados para la reacción inicial con los antígenos, actuando de ese modo como precursores de las células plasmáticas, pero era creencia general que los linfocitos no podían proliferar. Sólo un año más tarde, en 1960, Peter C. Nowell, de la Universidad de Pennsylvania, descubrió que los linfocitos podían proliferar, si recibían el estímulo químico adecuado.

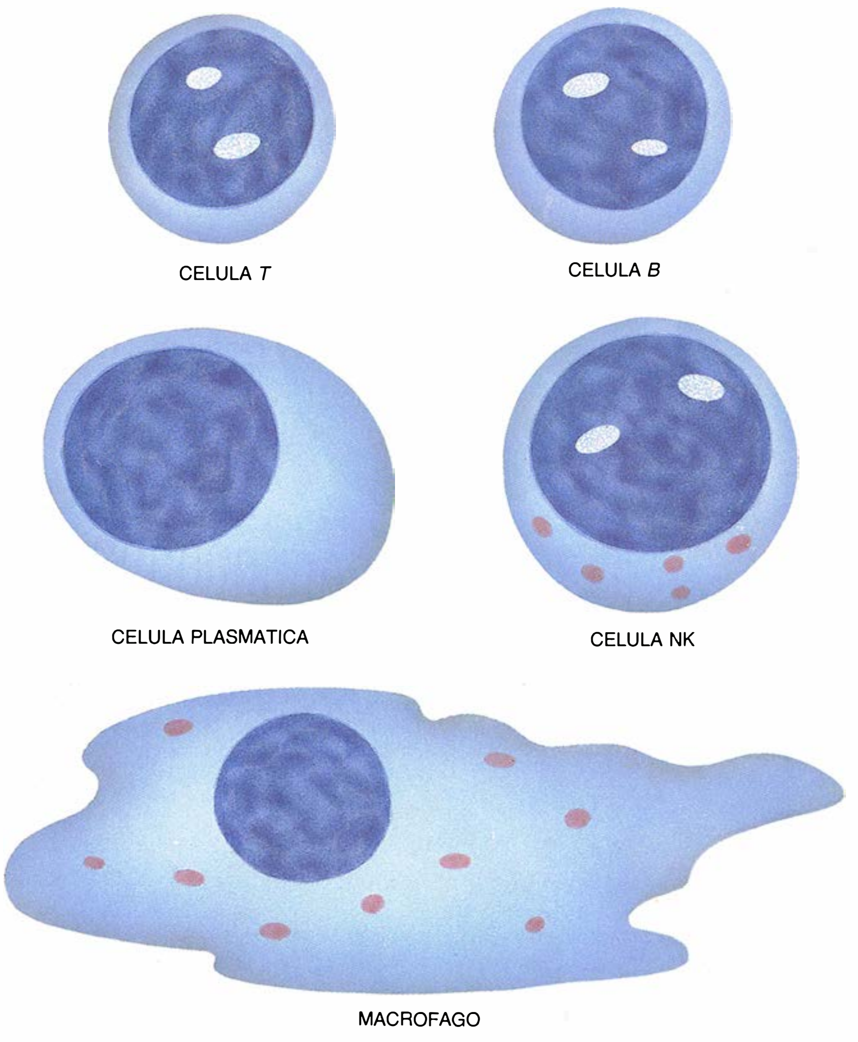
En la década siguiente a la hipótesis de Burnet y al descubrimiento de Nowell, se adquirió un sólido conocimiento celular del sistema inmune. Se supo de la existencia de dos tipos principales de linfocitos, las células *B* y las *T*. Las células *B*, que derivan de la médula ósea, expresan moléculas de anticuerpos en su superficie, como Burnet imaginó. Experimentos reali-



zados por Gustav Nossal, del Instituto Hall, y por Jerne y Albert A. Nordin, de la Universidad de Pittsburgh, demostraron que, estimuladas por un antígeno específico, las células *B* se convierten en plasmáticas y excretan anticuerpos con un solo tipo de especificidad.

Las células *T* maduran en el timo, y no producen anticuerpos; sin embargo, portan receptores antigénicos específicos en su superficie, que muestran un parecido sorprendente con las moléculas de anticuerpos y se unen selectivamente con los antígenos. Lo mismo que las células *B*, las *T* reaccionan a la estimulación antigénica segregando moléculas que median en su función inmunológica. Según las moléculas que segreguen, las células *T* se subdividen en células *T* coadyuvantes y citotóxicas. Se sabe ya que las células *T* coadyuvantes llevan a cabo su función excretando interleucinas. Por contra, las células *T* citotóxicas entran en contacto directo con las células infectadas y, tras liberar moléculas tóxicas, las matan, a ellas y a los microbios que portan.

Las células *T*, en concreto, resultaron un óptimo modelo de laboratorio donde investigar la respuesta inmune. Cuando se inyecta un antígeno en el cuerpo, la única reacción inmune que se detecta es la que se produce específicamente contra el antígeno. En cultivo, la proliferación de células *T* es también específica del antígeno: sólo las células que reaccionan contra un determinado antígeno sobreviven y se multiplican. Por esa razón, en 1965 se adoptó el cultivo a corto plazo de células *T* como modelo para reproducir en el tubo de ensayo la respuesta inmune. Además, el comportamiento de las células *T* en cultivo facilitaba la explicación del fenómeno de la memoria inmunológica: la exposición a un antígeno incrementaba selectivamente el número de células capaces de responder al mismo antígeno en el futuro.




**2. CELULAS PRINCIPALES del sistema inmune y diversidad de tareas que cumplen. Las células *T*, que son de dos tipos, reaccionan frente antígenos específicos (moléculas extrañas). Las células *T* citotóxicas segregan moléculas tóxicas para matar las células infectadas y los microorganismos invasores. Las células *T* coadyuvantes segregan interleucinas, o factores de crecimiento, que potencian la respuesta inmune. Las células *B* se parecen a las *T*, pero no atacan a los microorganismos directamente. Estimuladas por un antígeno, se diferencian y se transforman en células plasmáticas que segregan anticuerpos para combatir a los invasores. Las células asesinas naturales, o NK, no son específicas de antígeno; atacan a los microbios foráneos. Los macrófagos ingieren microorganismos y presentan los antígenos a las células *T*, para que éstas pongan en marcha la respuesta inmune.**

Los inmunólogos venían admitiendo que el antígeno era el único estímulo para la división de las células *B* y *T*. Esta suposición, que se convirtió en dogma, tuvo que revisarse para poder profundizar en los mecanismos implicados en el sistema inmune.

Los orígenes de los conocimientos actuales de los mecanismos responsables de la estimulación del crecimiento de linfocitos pueden remontarse a 1965, cuando dos equipos de investigación del Hospital Reina Victoria de Montreal, Shinpei Kasakura y Louis Lowenstein y, de forma independiente, J. Gordon y Lloyd D, MacLean, publicaron simultáneamente artículos en la revista *Nature*. Los dos equipos coincidían en que medios de cultivo "condicionados" por la proliferación de linfocitos contenían una sustancia sin identificar que estimulaba el crecimiento de los linfocitos en presencia del antígeno.

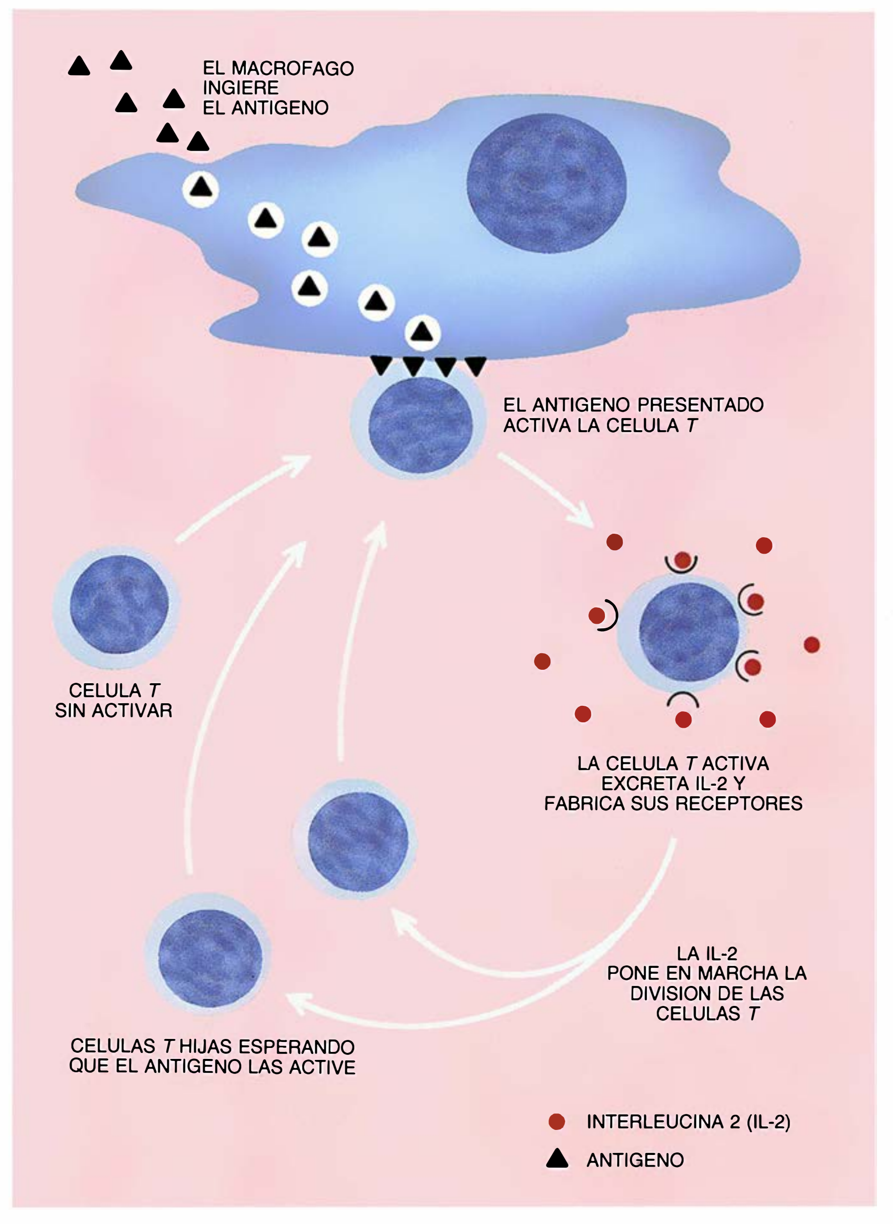
En la siguiente década aparecieron otros muchos artículos donde se hacía referencia a esas misteriosas sustancias que estimulaban el crecimiento. No obstante, la mayoría de los inmunólogos ignoraron dichos informes y continuaron sosteniendo que los antígenos eran los únicos agentes responsables de la proliferación de los linfocitos. Como mucho, se aceptaba que el factor del medio condicionado por los linfocitos fomentaba la proliferación que ya había sido puesta en marcha por un antígeno. Guiados por esta idea, diversos investigadores publicaron varios artículos a principios de los años setenta; describían allí métodos para cultivar linfocitos durante períodos largos, mediante la adición reiterada de antígeno. Con estas técnicas se estimulaba la proliferación de linfocitos en cultivo, hasta cuatro meses, sin perder su especificidad antigénica.

Los inmunólogos ponían en duda que un factor liberado por las células estimulase específicamente la división de los linfocitos. Creíase que tal factor fomentaría la proliferación de todos los linfocitos, con independencia

de que éstos hubiesen o no encontrado su antígeno específico. En 1976, sin embargo, Doris A. Morgan, que a la sazón trabajaba con Francis W. Ruscetti, en el laboratorio de Robert C. Gallo, en el Instituto Nacional del Cáncer (INC) en Bethesda, publicó un artículo en el que sostenía que las células *T* humanas normales podían cultivarse sin la presencia de antígeno hasta nueve meses, siempre que a intervalos regulares se añadiese, al cultivo, medio condicionado linfocitario.

La observación de Morgan fue en realidad la suerte del novato. Como tal se consideraba ella en el cultivo de linfocitos, pues su área de especialización abarcaba la hematología y hematopoyesis (proceso por el que se desarrollan las células sanguíneas). En su empeño por establecer cultivos duraderos de células leucémicas, Morgan utilizó como estimulante un medio condicionado por linfocitos, ya que se sabía que éstos liberaban factores que promovían el crecimiento de las células hematopoyéticas. Para mayor desazón, observó ella que las células de los pacientes leucémicos que crecieron en el medio condicionado linfocitario parecían células *T* normales y no células leucémicas. Para los inmunólogos, sin embargo, tal descubrimiento revestía especial interés, ya que sugería que algún tipo de factor presente en el medio condicionado, distinto del antígeno, era el responsable del crecimiento de las células *T*.

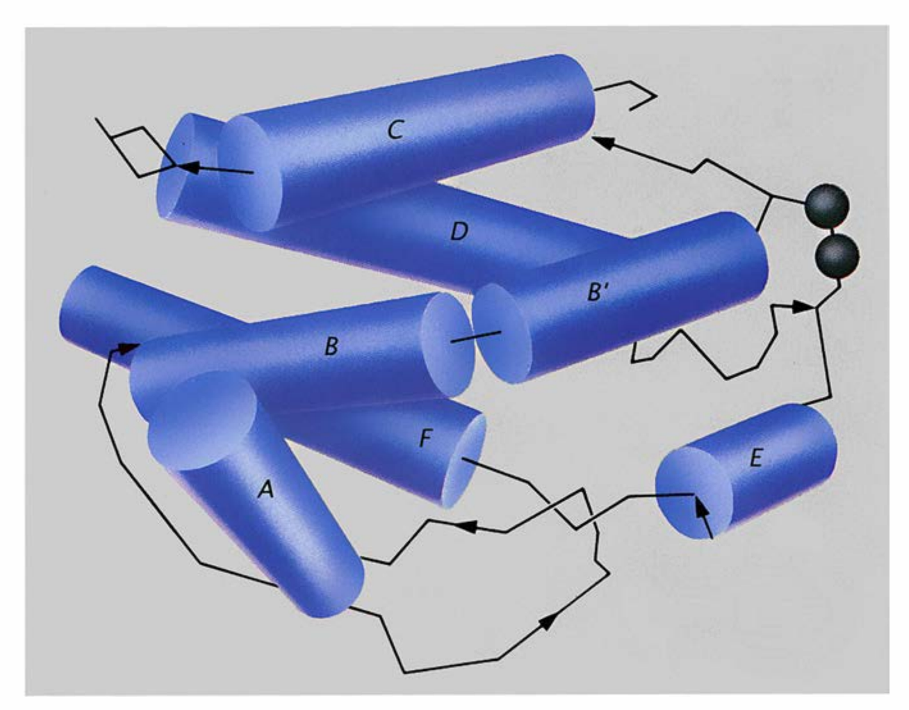
Aunque el artículo de Morgan apareció en la prestigiosa revista *Science*, su importancia no fue percibida por la mayoría de los inmunólogos. Morgan y sus colaboradores eran conocidos en los círculos de hematólogos y virólogos, pero no entre la mayoría de los inmunólogos. El título del artículo recalcaba, además, que las células *T* cultivadas procedían de médula ósea, esto es, que podían ser inmaduras, o en cualquier caso no representativas de la mayoría de las células *T*. Además, no se indicaba que las células cultivadas llevasen a cabo alguna función antigénica específica; los inmunólogos, desde siempre, mostraban total indiferencia ante los fenómenos que carecían de especificidad antigénica.




**3. PROLIFERACION de células *T*, controlada por la IL-2 una vez que un antígeno, ingerido y presentado por un macrófago, activa células *T* individuales. El antígeno estimula las células *T* y provoca que segreguen IL-2 y sinteticen receptores para la propia IL-2. Posteriormente, la unión de la IL-2 con sus receptores es la señal para que las células *T* se dividan, produciendo nuevas células hijas, que pueden también ser activadas por el antígeno. Se desarrolla así un clon de células *T* de idéntica especificidad antigénica, hasta que el sistema inmune elimina el antígeno del cuerpo.**

Como en el caso de Morgan, mi experiencia también procedía del campo de la hematopoyesis, no de la inmunología. Trabajé como becario postdoctoral con George Mathe, del Instituto del Cáncer e Investigaciones Genéticas, de Villejuif, Francia, pionero de los investigadores que intentó el tratamiento de la leucemia con inmunoterapia. Me intrigaba la posibilidad de estimular el crecimiento de linfocitos citotóxicos para matar células leucémicas. Por ello, en 1974, siendo profesor auxiliar de medicina en la Facultad de Medicina de Dartmouth, inicié un programa de investigación encaminado a encontrar los determinantes fundamentales de la proliferación celular. En 1976 demostramos que las células *T* citotóxicas podían matar células leucémicas de ratón en cultivo. No obstante, nuestra frustración fue mayúscula: apenas conseguíamos mantener el cultivo de células *T* unos pocos días. Decidimos, por tanto, aplicar nuevos métodos que nos permitiesen un crecimiento de larga duración de células *T* específicas del antígeno.

Sin las ataduras dogmáticas de los inmunólogos, combinamos algunos de los métodos que otros habían ensayado. Comenzamos por vacunar a los ratones repetidamente con células tumorales irradiadas, y así incrementar en los animales la población de células *T* dotadas de capacidad de reacción contra el tumor. A continuación,




**4. ESTRUCTURA de la molécula de IL-2, evidenciada por cristalografía de rayos X. Los 133 aminoácidos del esqueleto proteínico de la molécula están enrollados y plegados en una forma más o menos esférica. Los cilindros (*A-F*) representan zonas de fuerte enrollamiento. La molécula de IL-2 debe permanecer estructuralmente intacta para que reaccione con las dos cadenas del receptor.**

se mezclaron, en cultivo, las células *T* de ratón con las células tumorales; en estos cultivos de corta duración, sólo las células *T* que reaccionaran contra los antígenos tumorales sobrevivirían y proliferarían. Una o dos semanas después, las células *T* supervivientes se transfirieron a un medio condicionado linfocitario, similar al descrito por Morgan. Steven Gillis, a la sazón estudiante del primer curso de doctorado, fue la primera persona del laboratorio que consiguió un cultivo de larga duración de células *T*.

Al poco tiempo, y a pesar de la opinión general de que este enfoque estaba llamado al fracaso, por haber eliminado el antígeno tumoral específico comprobamos que los linfocitos *T* citotóxicos específicos de los antígenos tumorales crecían sin cesar en el medio condicionado. El artículo apareció en *Nature* en julio de 1977. A diferencia del poco interés que suscitó el artículo de Morgan, nuestra publicación tuvo una gran aceptación en la comunidad de inmunólogos, ya que hacía especial hincapié en el cultivo de celulas *T* funcionales, específicas de antígeno.

El éxito obtenido nos hizo pensar que podríamos corroborar directamente la hipótesis clonal de Burnet mediante el desarrollo de clones de células con una especificidad antigénica derivadas de una misma célula. De nuevo, navegábamos contra la opinión general; se tenía aquella por una tarea punto menos que imposible, ya que las células individuales crecían muy mal en cultivo, si es que crecían. Sin embargo, la adición del medio condicionado por linfocitos permitió cosechar clones de células *T* de sorprendente eficacia. Cada clon mostraba una citotoxicidad específica de antígeno, propia de la descendencia clonal de una sola célula. En 1979, veinte años después de que Burnet formulase su teoría de la selección clonal, publicamos el primer caso de obtención de líneas de células *T* citotóxicas monoclonales.

Problemas fundamentales de inmunología, imposibles de abordar con poblaciones heterogéneas de linfocitos, se resolvieron con líneas celulares clonadas, portadoras de una sola especificidad antigénica. En ese sentido, el cultivo de un número ilimitado de células *T* idénticas permitió la caracterización molecular del receptor antigénico de las células *T*. Contribuyó también a demostrar de manera inequívoca que una estructura de proteínas, el complejo principal de histocompatibilidad, desempeña un papel fundamental en el reconocimiento del antígeno por parte de las células *T*. La posibilidad de desarrollar clones de células *T* citotóxicas y coadyuvantes adquirió particular interés a la hora de identificar los mecanismos moleculares implicados en las actividades de dichas células. En poco tiempo, la posibilidad de obtener y manipular clones de células *T* en cultivo suministró pruebas moleculares detalladas en favor de la hipótesis de la selección clonal de Burnet.

Estos primeros experimentos suministraron algunas claves para explicar de qué manera la selección específica de un clon por un antígeno desencadena una proliferación celular que depende sólo de un factor de crecimiento. La explicación más lógica es que, cuando el antígeno activa un linfocito, éste desarrolla una capacidad diferencial para responder al factor de crecimiento; la gran mayoría de linfocitos (que no responden al mismo antígeno) permanecen inactivos.

Mis colegas y yo realizamos una serie de experimentos para someter a prueba esa teoría. En 1978, con enorme ilusión, enviamos los resultados a una de las revistas de inmunología más prestigiosas. Para nuestra desgracia, sin embargo, la idea de un factor de crecimiento era todavía demasiado herética: todo el mundo "sabía" que el antígeno era lo único que estimulaba la proliferación de las células *T*. Los revisores que evaluaron el artículo, al parecer, fueron escépticos, e insistieron en pedir una detallada información bioquímica sobre el factor, que entonces no teníamos.

Por tanto, centramos nuestros esfuerzos en definir las características bioquímicas y biológicas del factor de crecimiento de las células *T*. Aunque los factores de crecimiento de los linfocitos estaban descritos desde 1965, nadie había desarrollado un ensayo cuantitativo para medir sus actividades; era, por tanto, imposible detectar y comparar cantidades relativas de los factores durante los procedimientos de purificación. El principal problema con que tropezaron los investigadores que anteriormente trataron de caracterizar algunos factores fue la heterogeneidad de los cultivos celulares utilizados en los ensayos. Debido a dicha heterogeneidad, no podía saberse qué células estaban respondiendo a cada uno de los muchos factores presentes en el medio condicionado por los linfocitos.

Sin embargo, una vez obtenidas líneas monoclonales de células dependientes de un factor de crecimiento, el problema de la heterogeneidad celular en el ensayo estaba resuelto. Además, en mis tiempos de becario postdoctoral, había desarrollado yo un ensayo cuantitativo para la eritropoyetina, el factor de crecimiento de

los glóbulos rojos. No me costó adaptar ese método para cuantificar el factor de crecimiento de las células *T*.

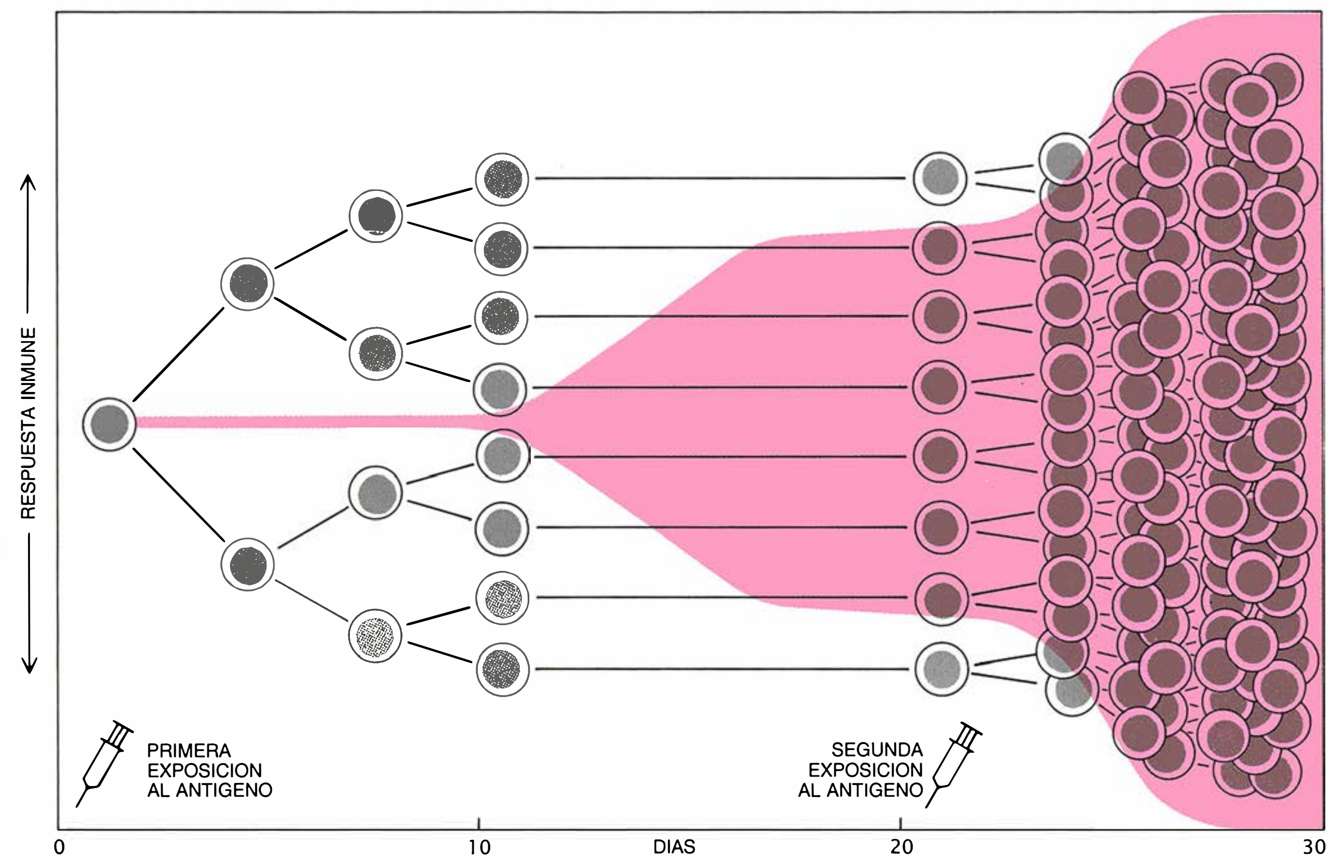
Armados con un ensayo rápido y cuantitativo, realizamos una serie de experimentos, publicados en varios artículos entre 1978 y 1983, que, en conjunto, describían las características biológicas y bioquímicas del factor de crecimiento de las células *T* que ahora recibe el nombre de interleucina-2. Estos estudios demostraron que el sistema inmunológico, una vez que detecta a un antígeno, transfiere el control sobre la respuesta inmunológica desde un mecanismo regulado por antígenos hacia un sistema de regulación similar al de las hormonas.

Expliquemos el funcionamiento del mecanismo general. Cuando se introduce un antígeno en el cuerpo, es ingerido por los macrófagos (un tipo de células basureras) y las células *B*. Tras digerir el antígeno, "presentan" segmentos cortos de las moléculas antigénicas en sus superficies celulares. La mayoría de las células *T* del cuerpo no reconocen a los antígenos expuestos, y continúan circulando tranquilamente por el torrente sanguíneo y el sistema linfático. Algunas células *T*, sin embargo, portan receptores de antígenos que se unen a los antígenos presentados, estimulando las células. A continuación, las células *T* estimuladas por el antígeno se convierten en fábricas autónomas de factores de crecimiento (IL-2), que segregan al medio y estimulan la proliferación de las propias células *T*. El resultado final de este proceso es que sólo proliferan los clones de células *T* que reaccionan al estímulo antigénico.

Aunque demostramos que sólo las células *T* activadas por el antígeno responden a la IL-2, desconocíamos de qué forma interaccionaba ésta con las células para producir sus efectos. Sospechaba que en el mecanismo se hallarían implicados los receptores de superficie celular para la IL-2, igual que ocurre con los receptores para la insulina, que median en la actividad de esta hormona. Nuestros experimentos no tardaron en demostrar que las células *T* activadas absorbían la actividad IL-2; tal cabía esperar si eran portadoras de los receptores para la IL-2. Hallazgos que nos animaron a producir y purificar IL-2 marcada radiactivamente, con la que podríamos observar el proceso directamente. Los resultados de nuestros primeros ensayos fueron inapelables: la IL-2 se unía a las células porque éstas poseían receptores de alta afinidad en su superficie celular.

La aplicación de este concepto de hormona y receptor al sistema inmune ha ejercido un poderoso influjo en los modelos de regulación inmunológica. La inmunología celular había sostenido con anterioridad que los macrófagos, células *B* y células *T* se comunicaban entre sí exclusivamente mediante contactos íntimos. Tras el descubrimiento de la IL-2 y otros factores solubles y la introducción de la idea según la cual la expresión de los receptores de la IL-2 determina qué células participan en la respuesta inmune, las interacciones entre las células del sistema inmune perdieron su aureola mágica. Para entender dichas interacciones bastaba utilizar los mismos principios de la endocrinología, principios que describen las interacciones entre las hormonas y sus receptores.

Hacia 1982 se hizo patente que,




**5. BASE CELULAR de la respuesta inmune, que explica el fenómeno de la memoria inmunológica, gracias al cual el cuerpo responde antes y con intensidad en las posteriores exposiciones a un mismo antígeno. Aquí, la intensidad de la respuesta inmune es proporcional al grosor de la banda azul. Tras la primera exposición a un antígeno, la respuesta inmune no es detectable hasta los 10 o 14 días, tiempo que tarda un clon de células *T* antígeno-específicas en adquirir un tamaño eficaz. Ocurrida una segunda exposición, el tiempo de latencia es menor, ya que el número de células *T* en la sangre capaces de reaccionar frente al antígeno es mayor. El crecimiento exponencial del clon de células intensifica la respuesta inmune.**

para entender los mecanismos moleculares que inducen la proliferación de las células *T*, había que profundizar en el conocimiento de las estructuras de la IL-2 y su receptor. Este conocimiento estructural era también necesario para diseñar agentes que pudiesen, con fines terapéuticos, bloquear o mimetizar la interacción hormona-receptor. Un primer paso importante en ese sentido fue el aislamiento del gen de la IL-2, llevado a cabo en 1983 por Tadatsugu Taniguchi y sus colegas, en la Universidad de Tokio.

Una vez aislado el gen, mediante clonación génica se podía obtener su producto, la proteína, en cantidades virtualmente ilimitadas. Desde hace unos seis años, las empresas del sector biotecnológico venden la IL-2 y la distribuyen por todo el mundo. La disponibilidad de grandes cantidades de IL-2 pura permitió a David B. McKay y su grupo, de la Universidad de Colorado en Boulder, obtener cristales de IL-2 y deducir la estructura tridimensional de la molécula mediante cristalografía de rayos X, en 1987.

En 1984, Warren J. Leonard y otros, trabajando en el laboratorio de Thomas A. Waldmann, en el INC, y Toshio Nakaido, con Tasuku Honjo, Takashi Uchiyama y otros, en la Universidad de Kioto, publicaron simultáneamente el aislamiento de un gen para una presumible proteína receptora de la IL-2. Dicha cadena proteínica reaccionaba con un anticuerpo monoclonal contra el receptor de la IL-2 desarrollado por Uchiyama. Sin embargo, el pequeño tamaño de la cadena y su baja afinidad por la IL-2 indicaban que tal vez no se trataba del receptor de la IL-2 completo. Fue entonces cuando, en 1986, Keisuke Teshigawara, de la Universidad de Kioto, que trabajaba en nuestro laboratorio de Dartmouth, y Mitsuru Tsudo, también de la Universidad de Kioto, aunque investigando en el laboratorio de Waldmann, realizaron independientemente el descubrimiento sorprendente de una segunda cadena, más larga, del receptor de la IL-2.

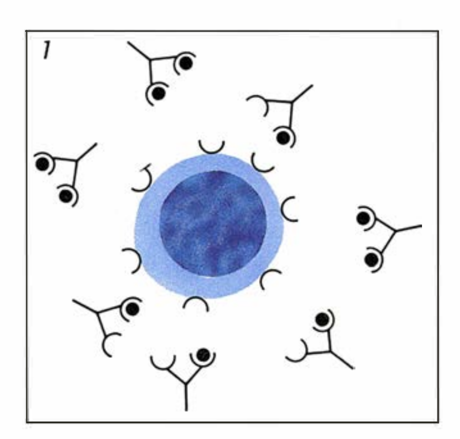
Resultó que el receptor de la IL-2 constaba de dos cadenas, una de 55 kilodalton, la que reaccionaba con el anticuerpo de Uchiyama, y otra de 75 kilodalton. Michael Sharon, del Instituto Nacional de Salud Infantil y Desarrollo Humano, en colaboración con Leonard, obtuvo también datos concordantes con esta interpretación. A finales de 1986 la mayoría de los investigadores iniciaron la carrera que llevaría al aislamiento y caracterización de la nueva cadena de 75 kilodalton.

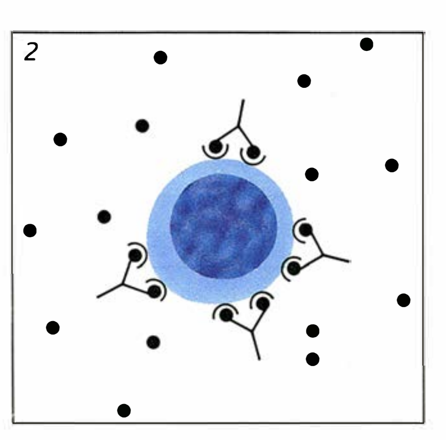
Tsudo ganó la lid, tras hacerse cargo de una plaza en el Instituto Metropolitano de Ciencias Médicas, de Tokio. A mediados de 1988 obtuvo anticuerpos monoclonales que reaccionaban con la cadena de 75 kilodalton. Colaboró luego con Masanori Hatakeyama, un joven hematólogo que trabajaba en el laboratorio de Taniguchi, en la Universidad de Osaka. Utilizando los anticuerpos de Tsudo, Hatakeyama identificó y aisló el gen que determina la cadena de 75 kilodalton.

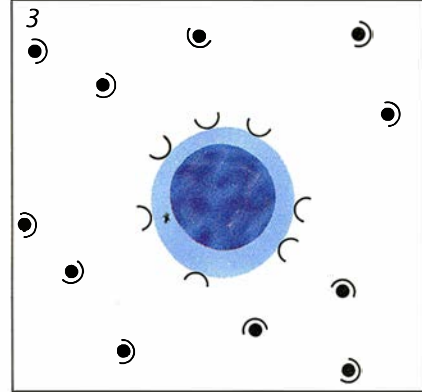
Mientras se desarrollaban estos estudios, nuestro trabajo en Dartmouth estaba centrado en la definición del papel desempeñado por el sistema receptor de la IL-2 en la respuesta inmune. En una serie de experimentos, Doreen A. Cantrell determinó cómo funcionaba el mecanismo receptor de la IL-2 en el curso de un modelo de respuesta inmune de las células *T*. Descubrió que había sólo tres parámetros importantes en la regulación de la proliferación de las células *T* tras la activación antigénica: la concentración de IL-2, la densidad de receptores IL-2 en la superficie celular y la duración de la interacción receptor-IL-2. Por lo que parece, antes de que una célula se vea irrevocablemente obligada a dividirse, debe experimentar cierto número de interacciones receptor-IL-2 durante varias horas.

Huey-Mei Wang, alumno recién graduado de mi laboratorio, amplió estos descubrimientos al demostrar que el receptor de la IL-2 funciona como un conmutador. La IL-2 se engarza rápidamente al receptor interaccionando con el sitio de unión de la cadena de 55 kilodalton. Queda fuertemente anclada gracias a la interacción con el sitio de unión de la cadena de 75 kilodalton. (Como la IL-2 debe interaccionar con las dos cadenas del receptor, la molécula ha de permanecer intacta para que pueda operar.) Esta interacción entre la molécula de IL-2 y la cadena de 75 kilodalton pone en marcha los mecanismos intracelulares responsables de la activación de las células *T*. Cuando la molécula se separa del receptor, hecho que sucede muy lentamente debido a la fuerza con que interacciona con la cadena grande, se interrumpe la señal de activación.

Mientras se produce la respuesta inmune, el antígeno desaparece gra-

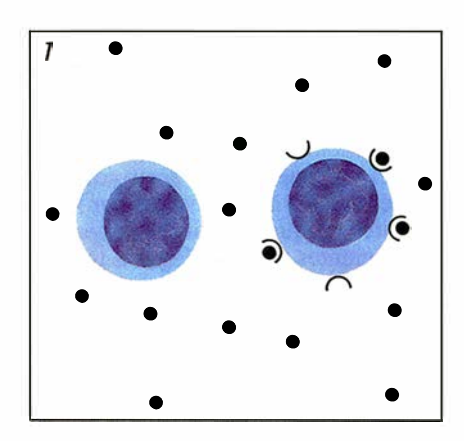


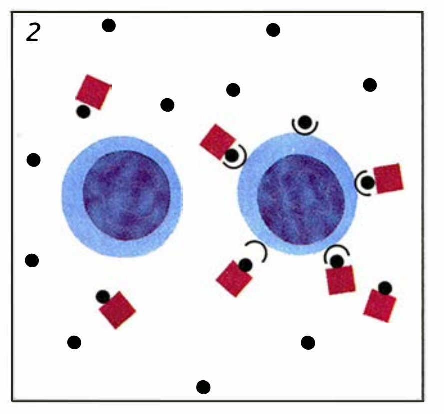



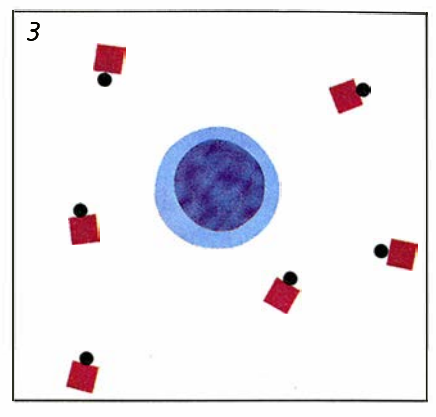






**6. SUPRESION SELECTIVA de la respuesta inmune. Sería ése un objetivo deseable en los transplantes de órganos y enfermedades de autoinmunidad. Un camino podría ser el de impedir la unión entre las moléculas de IL-2 y sus receptores en las células *T*, inyectando, por ejemplo, anticuerpos contra la IL-2 (*1*). Los anticuerpos contra los receptores de la IL-2 deberían tener el mismo efecto, ya que las moléculas de IL-2 no podrían encontrar receptores desocupados (*2*). Otra posibilidad sería la de inyectar receptores de IL-2 solubles, que competirían con los receptores celulares (*3*).**




IL-2
IL-2 CONJUGADA CON UNA TOXINA

**7. ELIMINACION de un clon específico de células *T*. Estamos ante otra forma de supresión del sistema inmune. Podría llevarse a cabo mediante la administración de interleucina-2 conjugada con una toxina bacteriana. Sólo las células *T* que han sido activadas por antígenos sintetizan interleucina-2 y sus receptores (*1*). Por tanto, el complejo toxina-IL-2 sólo se uniría y mataría las células *T* activas (*2*). Contrariamente, las células *T* inactivas no resultarían dañadas por las moléculas híbridas (*3*).**

dualmente del cuerpo; las células *T* que reaccionan frente a dicho antígeno dejan de recibir las señales procedentes de sus receptores antigénicos. En consecuencia, el número de receptores de IL-2 celulares disminuye de manera paulatina y cesa la proliferación del clon celular. El remanente de células *T* constituye la población de memoria del sistema inmune.

Las células *T* no son las únicas células que estimula la IL-2. Ya en 1981, Christopher S. Henney y sus colegas, de la Universidad de Washington, indicaron que las células asesinas naturales ("natural killer", NK) son estimuladas por la IL-2. Las células NK constituyen el 10 por ciento aproximadamente del total de la población de linfocitos circulantes; se cree que participan en la vigilancia inmunológica contra células cancerosas y en la respuesta inicial del cuerpo frente a los virus. Podrían crear la primera línea de defensa merced a su inmediata capacidad de respuesta a la IL-2. A diferencia de las células *T*, las NK carecen de receptores antigénicos y parece que se hallan siempre en estado de activación. Se ha observado que las células NK expresan continuamente la cadena de 75 kilodalton del receptor de la IL-2.

Las células *B*, como las *T*, permanecen inactivas hasta que entran en contacto con el antígeno. Se produce entonces la expansión clonal y se convierten en células plasmáticas, liberando grandes cantidades de anticuerpo. El papel de la IL-2 en estos cambios celulares sigue siendo motivo de cierta controversia, pero la mayoría de los investigadores coinciden en que promueve la proliferación de los clones de células *B* activadas por antígenos igual que estimula el crecimiento de las células *T*. Además, experimentos recientes realizados por Marian E. Koshland, de la Universidad de California en Berkeley, y Kenji Nakanishi, del Hyogo College de Medicina, han demostrado que la IL-2 participa en la diferenciación de las células *B* ayudándolas a iniciar la secreción de anticuerpos.

Todos estos resultados indicaban que el mecanismo IL-2-receptor desempeñaba un papel crucial en la regulación de los primeros procesos de la respuesta inmune. Era, por tanto, fácil imaginar vías para aprovechar esta interacción hormona-receptor, al objeto de intensificar o suprimir la respuesta inmune con fines terapéuticos. Los dos tipos más eficaces de drogas inmunosupresoras que se prescriben hoy son la ciclosporina y los glucocorticoides, inhibidores ambos de la producción de IL-2.

Mi colega Thomas L. Ciardelli, de Dartmouth, espera aprovechar el sistema constituido por receptor e IL-2 creando formas modificadas de la molécula de IL-2 que puedan servir como antagonistas de la IL-2 (uniéndose al receptor sin activarlo) o como "superleucinas", con efectos inmunoestimuladores mayores. John R. Murphy, de la Universidad de Boston, e Ira H. Pastan, del INC, han ideado, cada uno por su cuenta, otro modo de abordar la inmunosupresión. Con técnicas de ingeniería genética, estos investigadores han conseguido acoplar toxinas bacterianas a la IL-2. Estas moléculas híbridas tóxicas, tras engarzarse en células *B* y *T* activadas antigénicamente, las matan; eliminan así del cuerpo un clon dotado de especificidad antigénica.

Los anticuerpos monoclonales que reaccionan frente a la IL-2 o su receptor pueden suprimir también la respuesta de las células *T* activadas por antígeno. Los anticuerpos que bloquean la unión de la IL-2 a su receptor inhiben completamente la proliferación, específica de antígeno, de las células *T* en cultivo. Se ha observado que los anticuerpos son eficaces inmunosupresores con especificidad antigénica en los experimentos de transplante de corazón. El fragmento de la molécula receptora que se une a la IL-2 podría desempeñar la misma función, ya que compite con los receptores de la superficie celular por la IL-2.

La propia IL-2 tiene varias aplicaciones obvias como activador inmunológico. Ya que la IL-2 estimula la expansión clonal de las células *T* y *B* tras la introducción del antígeno, una utilización evidente de la IL-2 es la de inmunopotenciador: sustancia que refuerza la eficacia de la vacunación. La seguridad y eficacia de la IL-2 ya ha sido comprobada en seres humanos por Stefan C. Meuer, de la Universidad de Heidelberg, durante unos ensayos de inmunización con una vacuna contra la hepatitis B. Para las nuevas vacunas que se desarrollen mediante ingeniería genética, la disponibilidad de un inmunoestimulador eficaz como la IL-2 podrá muy bien determinar su éxito o fracaso.

Se ha incorporado ya la IL-2 en la inmunoterapia experimental contra el cáncer. Iniciada por Steven A. Rosenberg y sus colegas del INC, esta estrategia culmina una búsqueda casi centenaria en pos de una vía eficaz de utilización del sistema inmune para destruir células cancerosas. Hasta ahora, pacientes con tres o más tipos

de cáncer que suelen ser muy resistentes a las terapias habituales —melanomas malignos, cáncer de riñón y de colon— han mejorado con la administración de la IL-2 en combinación con células NK estimuladas por IL-2. La proporción de pacientes que han mejorado significativamente con la terapia es todavía baja, en torno al 20 por ciento. Sin embargo, muchos de los que han experimentado mejoría han conseguido una remisión bastante estable sin recurrir a ningún tipo de terapia posterior.

Entre las áreas más prometedoras de la terapia basada en la inmunoestimulación destacaremos el tratamiento de las enfermedades infecciosas. Desde la introducción de los antibióticos, a finales de los años cuarenta y a lo largo de la década siguiente, en la mayor parte del mundo desarrollado se han erradicado las enfermedades bacterianas más comunes. Pero no se han creado agentes antimicrobianos de similar eficacia contra hongos, parásitos y virus. Las enfermedades infecciosas continúan representando, además, uno de los principales problemas sanitarios de los países en desarrollo.

Muchas enfermedades infecciosas crónicas que no responden a tratamientos convencionales, como la tuberculosis, la lepra y la leishmaniasis, implican infecciones microbianas de macrófagos. Los macrófagos infectados liberan de manera constante sustancias inflamatorias que, con el tiempo, destruyen los tejidos circundantes. De los resultados obtenidos por Gilla Kaplan, Zanvil A. Cohn y sus colegas, de la Universidad de Rockefeller, se deduce que la activación y expansión de las células *T* y NK, promovidas por la IL-2, pueden inclinar la balanza en favor del sistema inmune: las células estimuladas por la IL-2 pueden matar las células infectadas y, de paso, a los microbios que contienen. El Tercer Mundo será probablemente quien primero se beneficie de esta inmunoterapia.

El SIDA comparte muchas de las características de estas otras enfermedades infecciosas crónicas. El virus de inmunodeficiencia humano (VIH), sin embargo, infecta a los macrófagos y también a las células *T* coadyuvantes; los afectados acaban perdiendo las células que son imprescindibles para poner en marcha una respuesta inmune eficaz. Como consecuencia de ello, las personas que padecen SIDA serán sensibles a todos los microbios comunes del ambiente. Los investigadores están ahora empezando los ensayos clínicos con la IL-2 para el tratamiento de las infecciones por el VIH, administrándola antes de que la inmunodeficiencia llegue a desatarse abiertamente. Si las células infectadas por el VIH pueden ser destruidas por las células *T* y NK activadas por la IL-2, antes de que el virus se propague, los pacientes pueden llegar a librarse de la devastadora pérdida de sus células inmunes.

La inmunosupresión, por su parte, puede desempeñar un papel importante en los países desarrollados, donde los transplantes de órganos y las enfermedades de autoinmunidad son más comunes. Las drogas actualmente disponibles son inmunosupresores de amplio espectro, y deben tomarse durante largos períodos de tiempo. Como consecuencia de ello, los receptores de transplantes de órganos y pacientes con enfermedades de autoinmunidad corren serios riesgos de infecciones potencialmente fatales durante el tratamiento. Se necesita un tipo de tratamiento que, por ejemplo, suprima sólo las células inmunes que reaccionan frente a un transplante de órgano o tejido, sin que se vea afectado el resto de las células inmunes. Cualquier aproximación que utilice el bloqueo de la interacción receptor-IL-2 suministrará tan necesitada especificidad.

En los treinta años transcurridos desde que Burnet enunció la teoría de la selección clonal, hemos asistido a un pormenorizado conocimiento, celular y molecular, que explica la regulación del sistema inmune. El establecimiento de la intervención decisiva de la IL-2 en la mediación de la propagación de un clon de células inmunes, una vez seleccionado por un antígeno, ha contribuido a ese avance. Ahora podrán idearse nuevas formas de estimular o inhibir el sistema inmune, para el tratamiento de enfermedades, basadas en un conocimiento racional de la inmunidad.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA


CELLULAR IMMUNOLOGY. Sir Macfarlane Burnet. Melbourne University Press, 1969.

INTERLEUKIN-2. Dirigido por Kendall A. Smith. Academic Press, 1988.

INTERLEUKIN-2: INCEPTION, IMPACT, AND IMPLICATIONS. Kendall A. Smith en *Science*, vol. 240, n.° 4856, págs. 1169-1176; 27 de mayo de 1988.

THE INTERLEUKIN-2 RECEPTOR. Kendall A. Smith en *Annual Review of Cell Biology*. Dirigido por G. E. Palade, vol. 5, págs. 397-425; 1989.

# Nuevas radiactividades

*Un núcleo atómico puede reestructurarse espontáneamente desprendiendo agregados extraños de protones y neutrones. Las observaciones de estas nuevas radiactividades han arrojado luz sobre las teorías de la dinámica nuclear*

Walter Greiner y Aurel Sandulescu

Las radiactividades son las cartas credenciales que nos llegan de un mundo remoto: el núcleo del átomo. Un núcleo puede proyectar un destello de energía, una pareja de protones, algunos neutrones u otras partículas. Cada embajador de éstos porta su propio mensaje. Muy a menudo indican la desintegración de un núcleo, de un estado energético inestable a otro menos energético y más estable. Las radiactividades proporcionan también sutiles indicios acerca de la estructura nuclear. Ensamblando adecuadamente todas las piezas, los investigadores han elaborado modelos detallados del núcleo, que no se limitan a interpretar la mayoría de los fenómenos nucleares, sino que predicen también muchos nuevos tipos de radiactividades. El éxito que supuso el descubrimiento de varios de estos nuevos fragmentos nucleares correspondió a la última década.

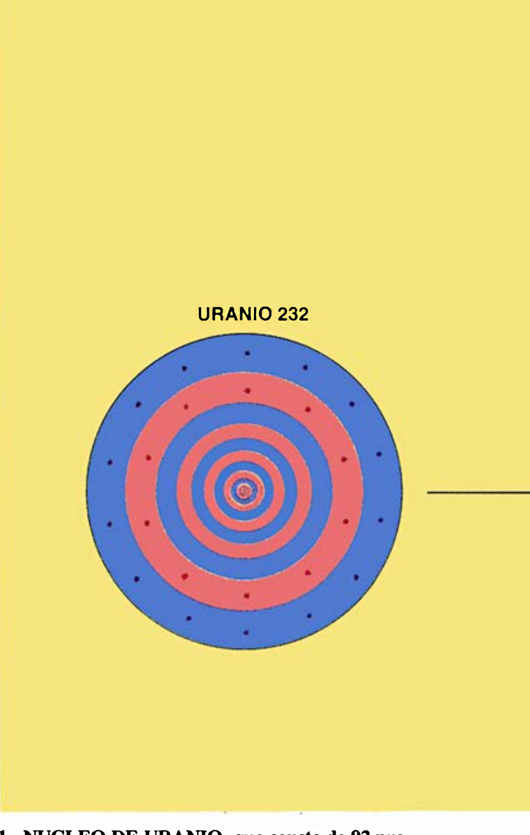
Los descubrimientos acabaron con el dilema que había acarreado la física nuclear durante 40 años. Hasta la década de los ochenta todo parecía indicar que los fragmentos nucleares originados en los procesos radiactivos se agrupaban en torno a tres tamaños, cuyos valores eran "grosso modo" de cuatro, 100 o 200 nucleones (término que alude tanto a protones como a neutrones). En la primera categoría se encuentra la partícula alfa, o núcleo de helio. Cuando un núcleo emite una partícula alfa, el núcleo resultante consta de unos 200 nucleones. En el tamaño de 100 nucleones tenemos los fragmentos de fisión, un proceso en el cual un núcleo pesado se escinde aproximadamente por la mitad. El restringido número de tamaños suscita una cuestión intrigante: ¿por qué el núcleo no emite un fragmento con otras cantidades de nucleones? ¿Por qué no 14 o 24?

Se ha comprobado que determinados núcleos se desintegran emitiendo núcleos de este o de cualquier otro tamaño. Estas nuevas radiactividades se manifiestan cuando múltiples nucleones del interior del núcleo se reagrupan espontáneamente en ciertas configuraciones. Por ser aleatorios estos macrorreagrupamientos, la existencia de una nueva radiactividad resulta, en general, un acontecimiento más raro que, por ejemplo, la emisión de una partícula alfa. Hacia finales de la década de los ochenta varios investigadores se habían encontrado con un buen número de esos nuevos embajadores que venían del núcleo.

Hallazgos que marcan una nueva era en la física nuclear. Pueden considerarse culminación de una serie de experimentos que comenzaron hace aproximadamente un siglo, cuando A. Henri Becquerel descubrió la radiactividad. Poco después, Ernest Rutherford distinguía entre los rayos alfa y los beta. Posteriormente, el físico francés Paul U. Villard identificó un tercer tipo, al que Rutherford denominó rayos gamma.

Durante años, estos y otros investigadores discutieron la naturaleza y origen de los citados rayos; hoy en día apenas quedan dudas al respecto. Un rayo gamma es una radiación electromagnética cuya longitud de onda es, en números redondos, un millón de veces más corta que la de la luz. Un rayo gamma transporta parte de la energía de una reacción nuclear, del mismo modo que la luz se lleva energía de una reacción química. La radiactividad beta se asocia a un electrón y a una partícula esquiva llamada antineutrino, o bien a las correspondientes antipartículas. Una partícula beta emitida por un núcleo revela la transformación de un protón en un

WALTER GREINER y AUREL SANDULESCU comparten un ávido interés por la teoría de la fisión nuclear. Desde 1965 Greiner da clases en la Universidad Johann Wolfgang Goethe de Frankfurt, cuyo instituto de física teórica ha dirigido. Pasó sus años de formación en Frankfurt, Darmstadt y Freiburg; en la universidad de esta última se doctoró. Sandulescu ha investigado en el Instituto de Física Atómica de Bucarest desde 1956. De 1983 a 1986 fue vicedirector del Instituto de Investigación Nuclear de Dubna, URSS.




**1. NUCLEO DE URANIO, que consta de 92 protones y 140 neutrones; debería desintegrarse en plomo (82 protones y 126 neutrones) y neón (10 protones y 14 neutrones). Lo mismo que otros**

neutrón. Un rayo alfa consta de dos protones y dos neutrones. Esta combinación, que se conoce como partícula alfa, es idéntica al núcleo de helio 4 (el número másico, en este caso "4", representa el número de protones y neutrones en el núcleo).

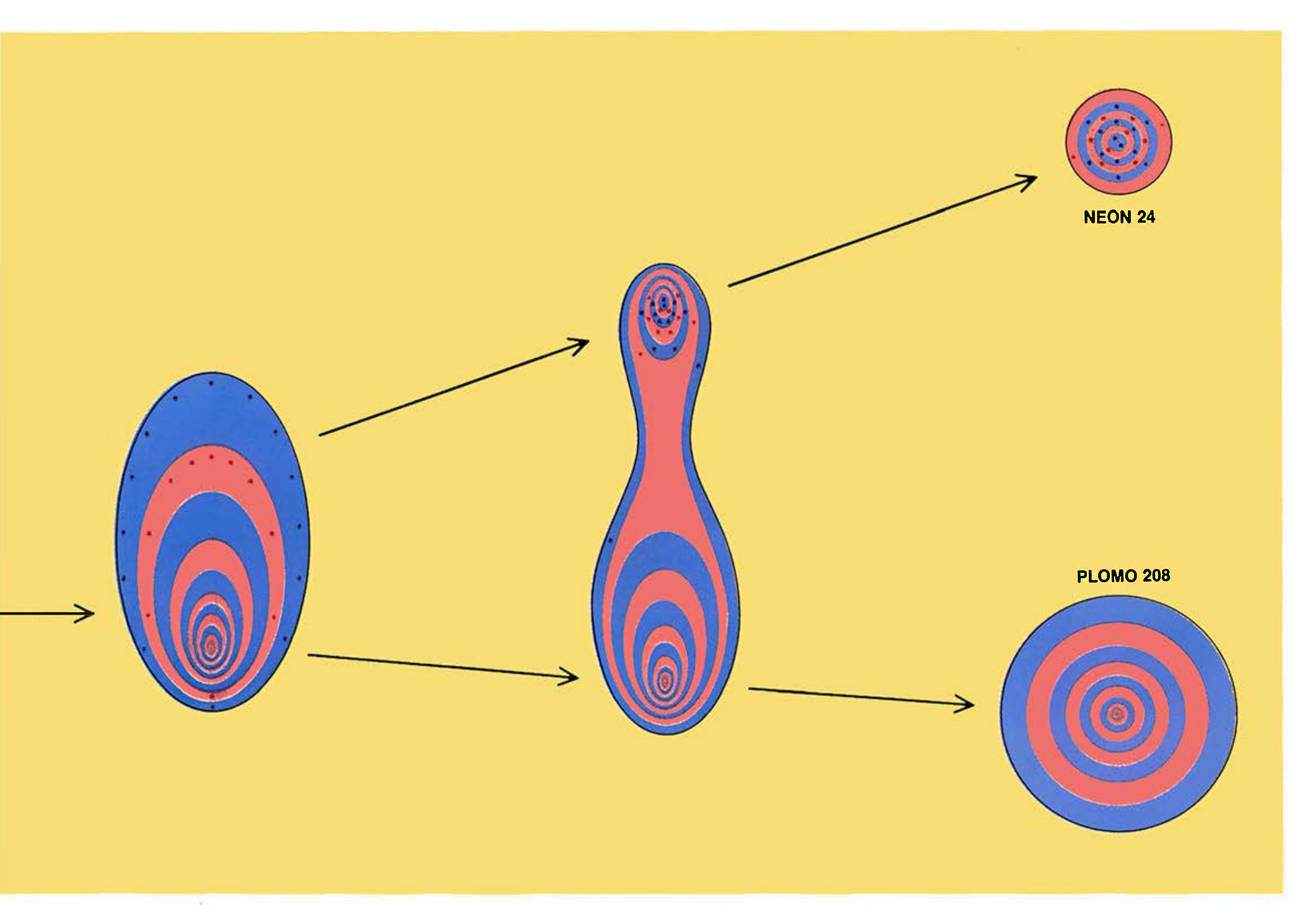
Desde el punto de vista de la estructura nuclear, la emisión de una partícula alfa constituye, quizás, el tipo de radiación más interesante. La emisión alfa representa la desintegración de un núcleo progenitor en dos núcleos hijos: un núcleo de helio 4 y otro dotado de mayor masa. En el momento en que se descubrió la desintegración alfa, sin embargo, los investigadores no estaban capacitados para explicar el fenómeno. Ni poseían los conocimientos básicos acerca de la forma del núcleo ni sobre la índole de las interacciones existentes en su seno.

Hoy día se sabe que el núcleo atómico es un objeto aproximadamente esférico cuyo diámetro mide unos pocos fermi (milbillonésima de metro: $10^{-15}$ metros). Los electrones orbitan en torno al núcleo a una distancia de unos 100.000 fermi. (Por mor de comparación, el radio de la órbita lunar es sólo unas treinta veces superior al diámetro terrestre.) La casi totalidad de la masa del átomo se halla empaquetada en este núcleo de escasos fermi de tamaño, así como la totalidad de su carga positiva. La masa del núcleo la aportan principalmente los nucleones. Los protones portan la carga positiva.

La estructura del núcleo es el resultado de dos tipos de interacciones: la fuerte y la electromagnética. En virtud de la interacción fuerte, o fuerza nuclear, los protones se enlazan con los neutrones y ambos entre sí. La fuerza nuclear traba vigorosamente los nucleones, aunque posee un cortísimo radio de acción. Así, para separar dos neutrones situados a un fermi de distancia se requiere una energía de aproximadamente un millón de electronvolt; sólo se necesitan 10 electronvolt para disociar los nucleones que se hallan alejados 10 fermi.

En virtud de la interacción electromagnética, o fuerza de Coulomb, los protones se repelen entre sí. Aunque la fuerza de Coulomb es más débil que la nuclear, posee un alcance mucho mayor. Si la distancia entre dos protones es de un fermi, la fuerza de Coulomb resultará unas 100 veces más débil que la correspondiente fuerza nuclear. Sin embargo, a una distancia de 10 fermi, la intensidad de la fuerza de Coulomb es unas 10 veces más fuerte que la nuclear.

Estas relaciones conllevan importantes implicaciones en la desintegración alfa. Antes de que una partícula alfa abandone el núcleo, se halla sometida tanto a la atracción nuclear debida a otros nucleones como a la repulsión de Coulomb por parte de otros protones. Para que una partícula alfa pueda escapar del núcleo debe adquirir energía suficiente que le permita alcanzar el punto en que la




**núcleos, el de uranio consta de una serie de capas ocupadas por cierto número de protones (*rojo pálido*) o de neutrones (*azul pálido*). La capa de neutrones más externa del núcleo de uranio puede alojar hasta 58 neutrones, pero en este caso posee sólo 14 (*puntos azules*). La correspondiente capa de protones contiene 10 protones (*puntos rojos*) de los 44 posibles. Debido a que los protones (y neutrones) no saturan las capas del núcleo de uranio, su estructura nuclear es inestable. Por ello, el núcleo de uranio puede deformarse de manera espontánea y escindirse en dos núcleos estables.**

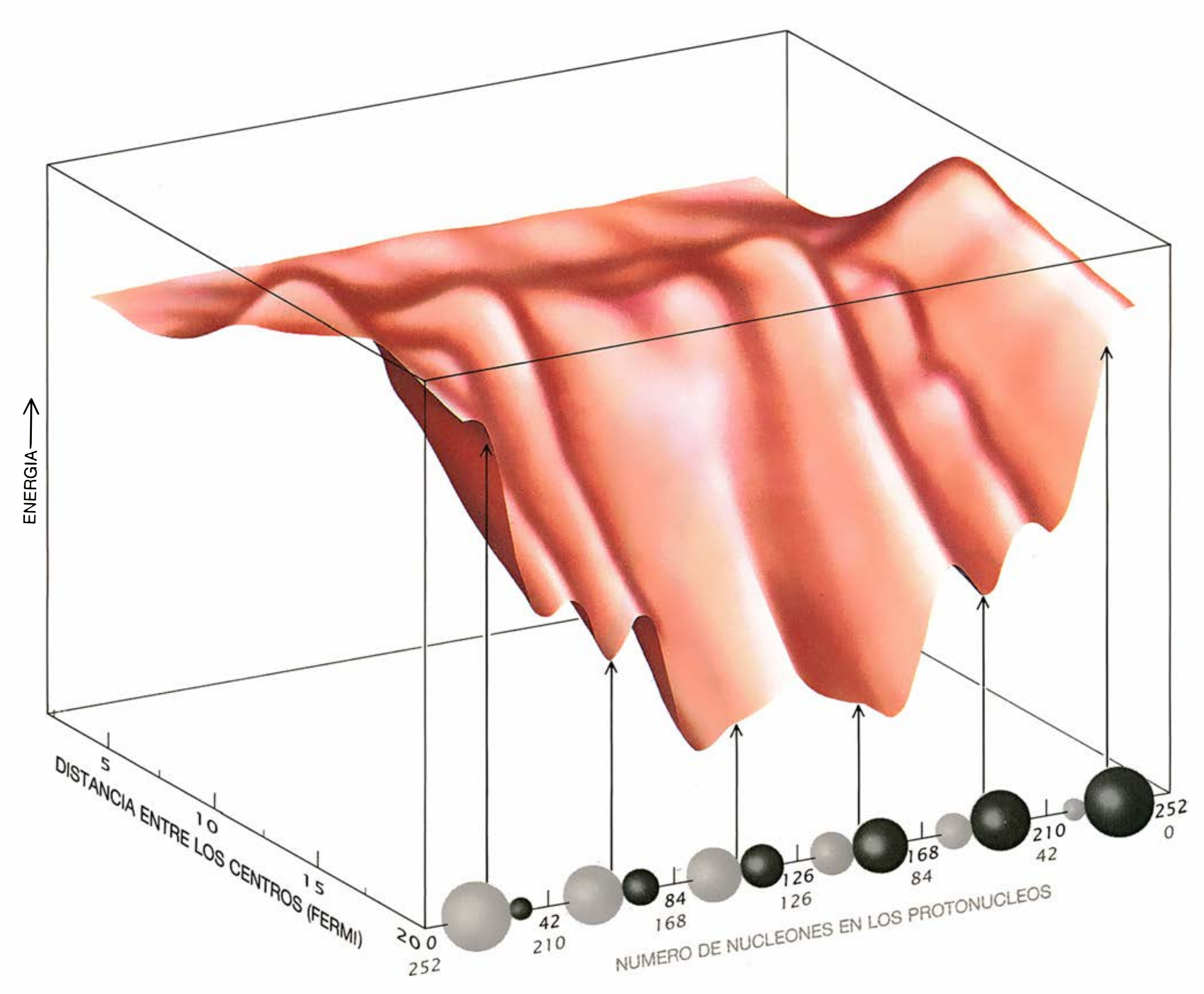
repulsión coulombiana exceda a la atracción nuclear.

La energía necesaria para la desintegración alfa puede proceder de una fuente externa, si bien ciertas clases de núcleos poseen la suficiente energía interna para facilitar la emisión espontánea de una partícula alfa. El criterio para la emisión espontánea reside en que la masa del núcleo progenitor supera la suma de las masas del núcleo hijo y de la partícula alfa. Puesto que la masa y energía son equivalentes se puede decir que, si la energía de un núcleo es superior a la suma de las energías del núcleo hijo y de la partícula alfa, dicho núcleo podrá desintegrarse emitiendo una partícula alfa.

¿Por qué posee el núcleo progenitor más energía que la del núcleo hijo y la partícula alfa sumadas? La energía del núcleo padre no sólo engloba la energía asociada con la masa de todos los protones y neutrones, sino también la energía de enlace (la energía requerida para mantener unidos los nucleones). Gran parte de esta energía se emplea en contrarrestar la energía de repulsión entre los protones. La energía de enlace por cada nucleón dentro del núcleo es, por término medio, de ocho millones de electronvolt (Mev). La energía de enlace por nucleón puede diferir ostensiblemente del valor medio. En el helio 4 es de unos 7 Mev y de aproximadamente 9 Mev para el hierro 56.

Un núcleo con elevada energía puede transformarse espontáneamente en otro de menor energía, emitiendo en el proceso una partícula alfa de gran velocidad. Hasta 1928 los físicos no pudieron predecir la cantidad de energía liberada en dicho proceso. En ese año, el físico ruso-americano George Gamow interpretó el fenómeno de la desintegración alfa en el marco de los principios de la mecánica cuántica, por aquel entonces una disciplina recién formulada.

Para ponderar la contribución de Gamow conviene considerar el comportamiento de la partícula alfa en el seno del núcleo. Una partícula alfa que se mueva dentro del núcleo semeja una bola rodando sobre una superficie ondulada. La altura de cada punto de la superficie equivale a la energía requerida para llevar una partícula hasta determinada distancia del centro del núcleo. La forma de la superficie viene a ser la de una profunda depresión (o pozo) situada en la cima de una colina, puesto que se necesita energía para vencer la fuerza nuclear;




**2. SUPERFICIE DE ENERGIA de un núcleo de nobelio 252, que sugiere los diferentes caminos que el núcleo puede seguir en el curso de su evolución hacia dos protonúcleos (precursores de los fragmentos emitidos en la fisión). Se muestra la energía en función de la distancia entre los protonúcleos y sus tamaños. Un protonúcleo puede tener más nucleones (protones y neutrones) que el otro, si bien el número de nucleones del núcleo de nobelio 352 debe ser igual al número total de nucleones de los dos protonúcleos. El nobelio 252 se desintegra con mayor facilidad en protonúcleos de relativamente baja energía. Por consiguiente, los valles en la superficie de energía indican una vía plausible de fisión. Un valle muestra la formación de gadolinio 158 y estroncio 94; un segundo valle indica osmio 192 y hierro 60; por último, un tercero conduce a radón 214 y azufre 38.**

logrado esto, se libera energía porque a partir de cierto punto la fuerza de Coulomb repele a la partícula alfa. La energía exigida para salir del pozo se denomina barrera de potencial.

La energía que la partícula alfa absorbe de otros nucleones impulsa a la partícula alfa (bola) desde la profunda depresión. A tenor de las teorías de la física clásica, la partícula alfa sólo escaparía si recibiera el impulso que le capacitara para remontar la barrera de potencial (la bola es empujada fuera del pozo). Ahora bien, la partícula alfa no puede, en general, adquirir suficiente energía para remontar la barrera de potencial. De acuerdo con la mecánica cuántica existe una probabilidad de que la partícula alfa atraviese esa barrera (la bola atravesará la colina por un túnel). Gamow pudo calcular dicha probabilidad, así como la energía cinética de la partícula alfa emitida.

Entre 1900 y 1939 no se descubrieron nuevos tipos de radiactividad. En ese año los investigadores alemanes Otto Hahn y Fritz Strassman bombardearon una muestra de uranio con neutrones y demostraron la fisión del núcleo de uranio: se escindía en otros dos núcleos de masa y cargas similares. Un año después, Konstantin A. Petrzhak y Georgii N. Flerov, del Instituto de Investigación Nuclear de Dubna (URSS), comprobaron que el uranio también se fisiona espontáneamente. Desde 1939 hasta 1980 los grandes fragmentos de fisión, junto con los rayos alfa, beta y gamma constituyeron los únicos tipos de radiactividad observados en el laboratorio.

En los comienzos de la década de los cuarenta, el físico danés Niels H. Bohr elaboró una teoría para explicar la fisión nuclear de elementos pesados como el uranio. Bohr le sacó partido al hecho de que las fuerzas nucleares fueran de corto alcance. Supuso que un nucleón interaccionaba sólo con sus vecinos más próximos, del mismo modo que una molécula en un líquido actuaba sólo sobre las más cercanas, y consideró que un núcleo pesado podía asimilarse a una gota líquida.

Una gota nuclear vibra cuando absorbe energía. A causa de las vibraciones, la gota puede deformarse en otras dos menores, conectadas a través de un largo cuello. A medida que aumenta la distancia entre ambas gotas, la altura de la barrera de potencial (las fuerzas nucleares entre las dos gotas) disminuye. Esas dos gotas menores pueden atravesar la barrera de potencial siempre que la energía de los productos de la reacción (las gotas pequeñas) sea menor que la energía del núcleo deformado. Bohr calculó la probabilidad de que los dos fragmentos traspasaran un núcleo, magnitud denominada penetrabilidad de la barrera. Sus predicciones concuerdan satisfactoriamente con las mediciones de la fisión espontánea del uranio.

Persistían aún varias cuestiones. ¿Por qué ciertos núcleos se fisionaban y otros no? ¿Qué determinaba la velocidad de desintegración de los núcleos? ¿A qué obedecía que unos núcleos fueran más estables que otros? Con objeto de responder a estas cuestiones se emplearon, andando el tiempo, tres modelos nucleares: el de capas, el colectivo y el bicéntrico de capas.

En 1949 Maria Goeppert Mayer, del Laboratorio Nacional de Argonne, y Johannes H. D. Jensen, de la Universidad de Heidelberg, presentaron, cada uno por su lado, el modelo nuclear esférico de capas. Propusieron que, al igual que los electrones en un átomo, los nucleones se movían de acuerdo con los principos generales de la mecánica cuántica: los protones y neutrones ocuparían una serie discreta de estados, correspondiendo a cada uno cierta cantidad definida de energía y un movimiento de alcance determinado. El principio de exclusión de Pauli gobierna estos agrupamientos. Dicho principio establece que un protón no puede ocupar un estado energético ya ocupado por otro protón. Lo mismo es válido para los neutrones. Si los protones y neutrones se disponen en la configuración de menor energía, se dice que el núcleo se encuentra en su estado fundamental.

La diferencia de energía entre un estado y el de energía superior más próximo define un hueco de energía. En la mayoría de los casos, la amplitud de estos huecos es pequeña, si bien en otros es mayor. Los huecos relativamente amplios separan los estados energéticos en grupos o capas. Análogamente, los estados energéticos de los electrones del átomo se hallan segregados en capas.

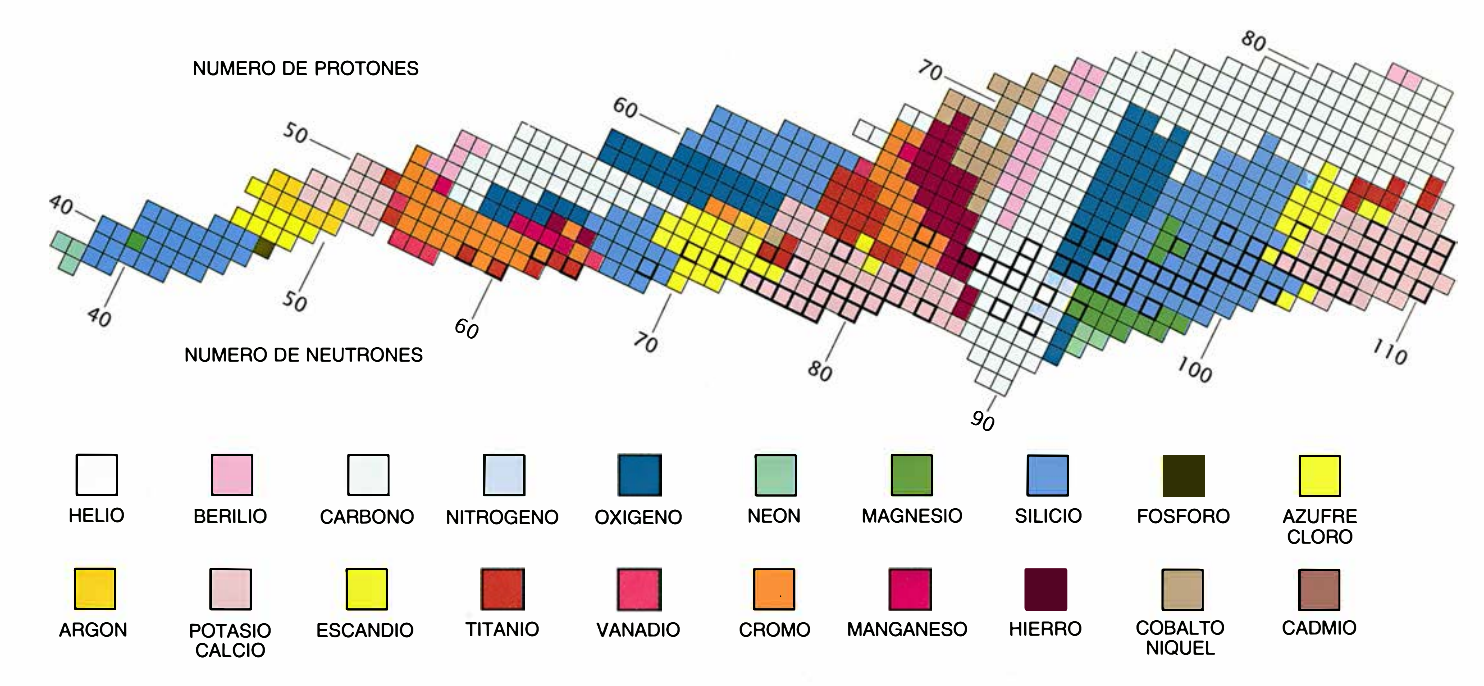
Las analogías entre las estructuras de las capas nucleares y electrónicas son muy acusadas. Si los electrones de un átomo completan una o más capas, como es el caso del helio y neón, el átomo es estable: químicamente inerte. Si las capas de un núcleo están todas ocupadas, como sucede con el calcio y el plomo, el núcleo es estable y, en consecuencia, esférico.

La primera capa nuclear se satura con dos protones e igual número de neutrones; la segunda capa queda llena con seis de cada clase de nucleones; e igualmente las otras capas se saturan con un número determinado de protones y neutrones. Merced a ello podemos predecir la estabilidad de un núcleo con sólo contar el número de protones y neutrones. Los núcleos estables constan usualmente de un "número mágico" de protones y neutrones; esto es, poseen 2, 8, 20, 28, 40, 50, 82, 126 o 184 protones o neutrones. Los núcleos con dos números mágicos gozan de particular estabilidad, como el calcio 48 (20 protones y 28 neutrones) y el plomo 208 (82 protones y 126 neutrones).

Aunque el modelo de capas es capaz de describir con bastante exactitud la estabilidad nuclear, no proporciona información acerca de la forma del núcleo ni de los cambios que ésa pueda experimentar. En 1952 Aage N. Bohr (hijo de Niels) y Ben R. Mottelson, del Instituto Niels Bohr de Copenhage, abordaron el problema. Propusieron el modelo colectivo, en el que se conjugan ciertos aspectos de los modelos de capas y de gota líquida. Del modelo de capas, Bohr y Mottelson recogieron la idea de que los nucleones de las capas incompletas más externas de un núcleo se movían bajo la influencia de las capas internas saturadas. Pero, mientras que el modelo de capas supone una estructura más bien rígida, el colectivo establece que la parte exterior del núcleo puede deformarse cuando los nucleones externos se mueven con respecto a los nucleones interiores. Este movimiento colectivo, o deformación, es propio del modelo de la gota líquida.

La mayoría de los núcleos son esferoides prolatos (en forma de puro); algunos son oblatos (con forma de disco). Estas deformaciones requieren que el núcleo gane o pierda energía. Si un núcleo cambia de forma poco a poco a medida que se le proporciona energía, se denomina núcleo duro; si esa deformación se produce rápidamente, se trata de un núcleo blando.

Aunque el modelo colectivo describe los cambios de forma del núcleo, no contemplaba ni los procesos de ruptura ni los de fusión con otros núcleos. Estos aspectos recibieron oportuna explicación en 1969, cuando uno de los autores (Greiner) y sus alumnos de la Universidad de Frankfurt propusieron el modelo de capas bicéntrico. El modelo se basaba en el trabajo de Sven G. Nilsson y Peter Möller, de la Universidad sueca de




Lund. Con una técnica desarrollada por Villen M. Strutinsky, del Instituto de Investigación Nuclear de Kiev, y V. V. Pashkevich, del Instituto de Dubna, uno de nosotros (Greiner) y Joachim A. Maruhn, de la Universidad de Frankfurt, investigamos posteriormente las implicaciones del modelo de capas bicéntrico en el proceso de fisión.

Al igual que el modelo colectivo original, el de capas bicéntrico predice las formas de núcleos individuales que se hallan próximos al estado fundamental. Además, el modelo de capas bicéntrico describe las múltiples vías que puede seguir un núcleo espontáneamente en su evolución hacia la aparición de dos protonúcleos: los precursores de los fragmentos emitidos en la fisión.

Por ejemplo, el plomo 208, que tiene 82 protones y 126 neutrones, puede transformarse en un protonúcleo de circonio 104 (40 protones y 64 neutrones) y en otro de molibdeno 104 (42 protones y 62 neutrones). El plomo 208 es muy estable (doblemente mágico) porque sus capas nucleares están saturadas. Aun así, la energía de los nucleones en las capas exteriores excede la energía de la barrera de potencial. En otras palabras, un nucleón instalado en la capa exterior puede superar la atracción de los nucleones internos y alejarse del centro de las capas.

En el curso de este movimiento, el nucleón atrae a otros nucleones de la capa exterior, y éstos comienzan a alejarse del centro original. Con el tiempo, los nuevos agregados pueden constituir dos protonúcleos estables: molibdeno 104 y circonio 104. Los protonúcleos pueden permanecer en dicho estado. También pueden superar su mutua atracción originando una fisión en dos núcleos independientes. En otros casos, los protonúcleos se recombinan para formar el plomo 208.

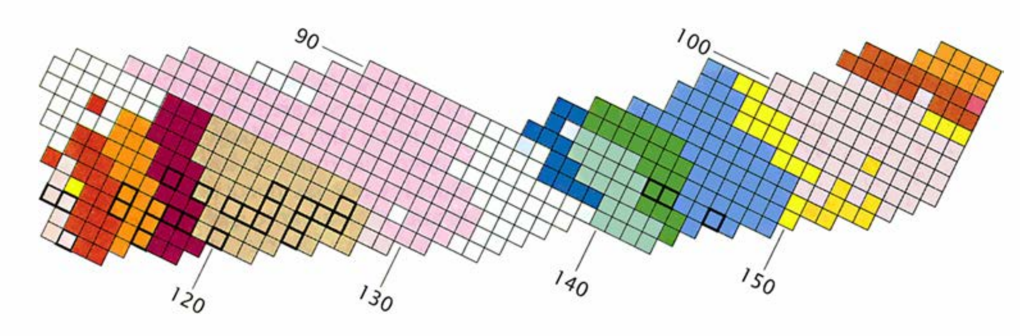
El modelo de capas bicéntrico proporciona varios métodos que describen los diferentes caminos a lo largo de los cuales un núcleo puede evolucionar espontáneamente hacia el estado de dos protonúcleos. Consideremos, por ejemplo, dos protonúcleos separados cierta distancia. Supongamos que uno de ellos posee varios nucleones y que el otro tiene los demás. El modelo de capas bicéntrico predice la cantidad de energía requerida para transformar el estado del núcleo original en este otro estado. Cabe preguntarse qué sucedería si el primer protonúcleo adquiriera otro nucleón o si los protonúcleos se alejaran. A tenor de estos aspectos podemos elaborar un mapa tridimensional de energía en función de la masa de un protonúcleo y la distancia entre ellos.

El resultado obtenido es una superficie de energía potencial con muchas montañas y valles [*véase la figura 2*]. Las montañas corresponden a estados de elevada energía, por tanto inestables. Los valles corresponden a núcleos y protonúcleos relativamente estables. Lo mismo que ocurre con la partícula alfa, existe una pequeña probabilidad de que un protonúcleo atraviese una montaña por un túnel hasta llegar a otro valle. Esta probabilidad (o penetrabilidad de la barrera) depende de la altura y anchura de la montaña de energía. Los mapas también revelan la cantidad de energía disponible para impulsar los fragmentos.

El modelo de capas bicéntrico ha proporcionado una descripción precisa de muchos fenómenos nucleares. Ha predicho también nuevos procesos de fisión, así como el de fusión de núcleos ligeros en núcleos superpesados. Del mismo modo que los valles en la superficie de energía indican que un determinado núcleo es capaz de desintegrarse en dos núcleos ligeros, pueden, también, mostrar que dos núcleos particulares se fusionan para formar un núcleo más pesado. Quiere esto decir, por tanto, que el modelo de capas bicéntrico permite la predicción y descubrimiento tanto de nuevos elementos como de nuevas radiactividades [véase "Creación de elementos superpesados", por Peter Armbruster y Gottfried Münzenberg; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, julio de 1989].

En 1977 predijimos la existencia de un proceso nuclear llamado fisión superasimétrica, así como la emisión de un nuevo tipo de radiactividad. Frente a la fisión ordinaria, la superasimétrica origina dos fragmentos cuyas masas y cargas son muy diferentes. La emisión del fragmento más liviano constituye un nuevo tipo de radiactividad. El agregado emitido suele ser varias veces mayor que la partícula alfa.

La fisión superasimétrica se observa en muchos núcleos. Así, un núcleo de nobelio 252 se desintegra en radón 214 y azufre 38, una radiactividad exótica. Esta reacción representa una




**3. FISION SUPERASIMETRICA que provoca que muchas especies de núcleos desprendan agregados de nucleones. Para cada especie los cuadraditos coloreados muestran el agregado que más fácilmente se va a emitir. Por ejemplo, un núcleo de estaño 112, compuesto de 50 protones y 62 neutrones, emite con mayor facilidad un agregado de cromo, núcleo que contiene 24 protones. El número de neutrones del agregado no se especifica en el mapa. Los cuadraditos blancos se refieren específicamente al agregado helio 5, con tres neutrones, y los lila al berilio 8, con cuatro neutrones. Los cuadraditos marcados con trazos gruesos muestran los núcleos estables que se encuentran en la naturaleza. El mapa se basa en los cálculos de Dorin N. Poenaru, del Instituto de Física de Bucarest.**

desintegración desde un estado inestable hacia otro bastante estable. Mientras que el nobelio 252 es muy inestable, un núcleo de radón 214, que consta de 86 protones y 128 neutrones, se halla próximo a la estructura, muy estable, del plomo 208, cuyas capas están completamente llenas con 82 protones y 126 neutrones.

¿Por qué el nobelio 252 se desintegra en radón 214 y no en plomo 208, núcleo más estable? La respuesta resulta inmediata a la luz del modelo bicéntrico de capas. Se puede obtener la superficie de energía potencial para el nobelio 252 en función de la distancia entre los protonúcleos y de la masa de uno de ellos. La superficie muestra tres valles, dos de ellos asociados al proceso de fisión superasimétrica y el otro asociado al de fisión ordinaria. Uno de los valles de la fisión superasimétrica indica la formación de un protonúcleo con un número másico de 214. Más concretamente, dos protonúcleos formados a partir del nobelio 252 y separados 20 fermi se hallan en un estado de baja energía cuando la masa de uno de ellos es 214 y la del otro 38. Una vez independizados, los protonúcleos pueden nuevamente experimentar procesos de fisión.

En 1978 nosotros y Dorin N. Poenaru, del Instituto Central de Física de Bucarest, comenzamos a predecir los tipos de núcleos que podrían dar lugar a radiactividad exótica. Para cada candidato intentamos calcular la penetrabilidad de la barrera. Encontramos que un núcleo de radio 224 tiene una probabilidad un millón de veces menor de desintegrarse emitiendo carbono 14 que de desintegrarse y emitir una partícula alfa. Análogamente, una muestra de torio 230 emitirá un agregado de neón 24 con una frecuencia mil veces menor que una partícula alfa. En 1979, Poenaru, Marin Ivascu y uno de nosotros (Sandulescu) demostramos que la desintegración alfa era un tipo de fisión superasimétrica. Tras este resultado, ensayamos la predicción del período de semidesintegración absoluto de varios elementos. Este período es el tiempo que debe transcurrir para que la mitad de la muestra de un elemento dado sufra desintegración alfa o cualquier otro tipo de fisión. Nuestros cálculos concuerdan bien con las mediciones experimentales.

Con objeto de encarrilar los experimentos hacia la búsqueda de nuevas radiactividades, necesitábamos encontrar respuesta a varias cuestiones: ¿qué especímenes de núcleos emitirán radiación exótica con mayor velocidad de desintegración? ¿Qué tipos de agregados pueden ser emitidos por un núcleo? ¿Cuáles son las tasas de emisión relativas entre un tipo dado de radiactividad exótica y cualquier otra? La resolución de tales problemas demanda el ensayo sistemático de unas 2200 clases de núcleos. Para cada posible núcleo progenitor deben buscarse todas las combinaciones, que suman un millón de posibilidades. Llevar a cabo esta tarea resulta arduo, incluso disponiendo de computadores tecnológicamente avanzados.

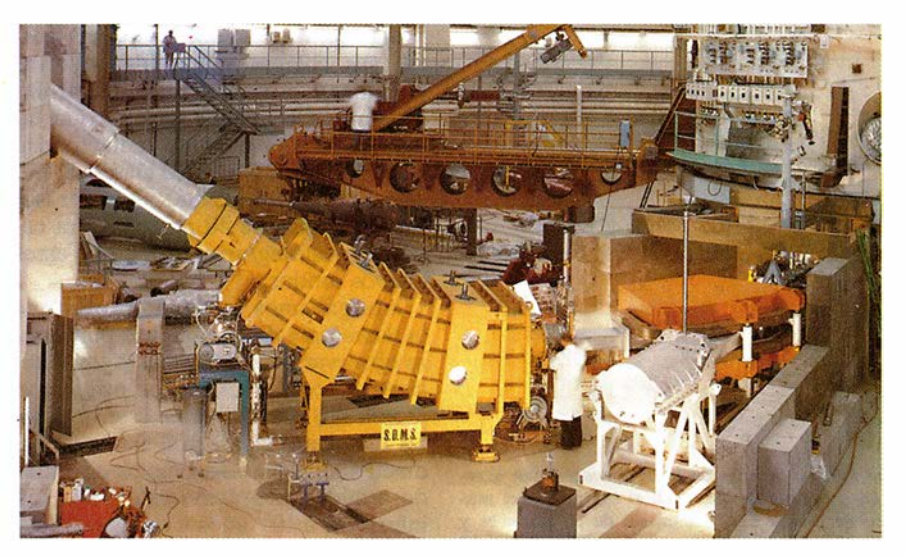
En 1980 un grupo de teóricos rumanos y alemanes comenzaron a elaborar el modelo analítico de fisión superasimétrica. Una vez acabado este programa de cálculo, Poenaru, Ivascu, sus colegas y uno de nosotros (Greiner), lo hemos utilizado profusamente. Obtuvimos una nutrida tabla de varias clases de radiactividad exótica para más de 800 clases de núcleos. Descubrimos que cualquier isótopo con más de 40 protones era capaz de desintegrarse a través de estos nuevos modos.

Abrigábamos la esperanza de que la tecnología disponible nos permitiera observar procesos de este tipo únicamente para núcleos que originaran plomo 208 o próximos a éste. Los tales incluyen más de 150 clases de radiactividades exóticas cuyos períodos de semidesintegración estimados son inferiores a $10^{23}$ años y cuyas energías cinéticas son de unos 2 MeV por nucleón.

Puesto que los agregados se emiten junto con un gran ruido de fondo de partículas alfa, el factor a destacar es el de la relación de bifurcación: la relación entre el número de emisiones de agregados y de partículas alfa para el mismo núcleo. Calculamos estas relaciones en la emisión de varios elementos ligeros; vimos que las radiactividades exóticas más fácilmente detectables correspondían al carbono 14, neón 24, neón 25 y magnesio 28. La relación de bifurcación para la desintegración del radio 223 en carbono 14 resultó ser de mil millones de emisiones alfa por cada una de carbono 14, siendo ésta la mayor relación de bifurcación que encontramos.

Después de una década de avances en la teoría nuclear, los experimentos comenzaron a poner de manifiesto la potencia predictiva del modelo de capas bicéntrico. En 1984 Hans Jürgen Rose y G. A. Jones, de la Universidad de Oxford, hallaron la primera prueba convincente de la radiactividad exótica. Con objeto de preparar una muestra para sus experimentos, separaron por métodos químicos el actinio 227 del uranio natural 235. El actinio 227 se desintegra espontáneamente en radio 223, candidato a la emisión del agregado carbono 14.

La fuente de actinio se colocó cerca de un detector. La energía de los fragmentos nucleares emitidos por la fuente queda registrada en el detector. A pesar de que éste podía distinguir entre fragmentos de carbono 14 y partículas alfa, aún podía resultar impreciso. Si tres partículas alfa llegaran al dispositivo casi coincidentes en el tiempo, la energía de este triplete podría parecerse a la energía correspondiente al carbono 14. Con objeto de evitar este problema, el ex-



**4. ESPECTROMETRO *LOHENGRIN*, instalado en el Instituto Laue-Langevin de Grenoble. Selecciona núcleos de determinada masa y carga de entre muchos otros. Los núcleos salen del reactor (*derecha*) y atraviesan un campo magnético generado en el aparato de color naranja. El campo magnético focaliza determinados núcleos en un punto situado detrás de los muros de hormigón (*izquierda*).**

perimento se diseñó de manera que el registro de un triplete fuese un suceso mucho más raro que el de un fragmento de carbono 14.

El experimento duró 189 días, registrándose 65.000 millones de partículas alfa y 11 sucesos asociados al carbono 14. Rose y Jones concluyeron que el carbono 14 se emitía cuando el radio 223 se desintegraba en plomo 209. Determinaron que el radio 223 emite un núcleo de carbono 14 por cada mil millones de partículas alfa. Pocos meses después, Alexei A. Ogloblin y sus colaboradores del Instituto de Energía Atómica I. V. Kurchatov de Moscú realizaron un experimento similar que corroboró los resultados de Rose y Jones.

Para mejorar estas mediciones e identificar otros tipos de radiactividad exótica, investigadores franceses y americanos utilizaron una estrategia diferente. Desarrollaron sistemas que filtraban de estas radiactividades la ingente horda de partículas alfa. En Francia, E. Hourani y sus colegas, de la Universidad de París, construyeron el SOLENO, un espectrómetro solenoide superconductor; en los Estados Unidos, Walter Kutschera, Walter F. Henning y sus colaboradores, del Laboratorio Nacional de Argonne, construyeron el Enge, un espectógrafo magnético multipolar.

El espectrómetro SOLENO genera un campo magnético mediante un conductor solenoidal, o bobina conductora. El campo magnético guía los núcleos cargados procedentes de la fuente a lo largo del espectrómetro. Cada tipo de núcleo posee una masa y carga características; por ello, el campo conduce a cada tipo hacia un determinado punto dentro del espectrómetro. Puesto que las partículas alfa son livianas y la mayoría poseen una carga positiva de dos unidades, tienden a concentrarse en un punto frente por frente al detector. Los núcleos de carbono 14, con mayor masa y seis unidades de carga, convergen sobre el propio detector.

En 1985 investigadores de la Universidad de París utilizaron, por primera vez, el espectrómetro SOLENO con objeto de observar la desintegración del núcleo de radio 223. En tan sólo cinco días identificaron 11 sucesos asociados a núcleos de carbono 14. Determinaron, además, sin dejar lugar a dudas, que los núcleos detectados tenían un número másico de 14. Comprobaron también que los núcleos de radio 222 y de radio 226 se desintegraban de forma espontánea emitiendo núcleos de carbono 14. La frecuencia de emisión resultó unas 10 veces menor que para el radio 223.

Muy poco después se iniciaron los experimentos con el espectrógrafo Enge, en el Laboratorio Nacional de Argonne. El instrumento opera de una manera similar al espectrómetro SOLENO. Diverge, sin embargo, en el detector, ya que en su interior contiene un gas que se ioniza al paso de un agregado. Durante seis días de funcionamiento, el espectrógrafo registró 24 núcleos de carbono 14 procedentes del radio 223.

Los sistemas más sensibles para la detección de las radiactividades exóticas son los detectores de trazas, que registran las partículas sobre una película especial. Un núcleo pesado que incida sobre la película origina un defecto. Un núcleo liviano, como el helio 4, atraviesa la película, y muy raramente deja una marca. Sometiendo la película a un revelado en un baño químico, las zonas de los defectos producidos por las partículas son atacadas más rápidamente que el resto de la película. Ocurre, además, que la rapidez con que son atacadas esas zonas es proporcional a la masa y carga del núcleo responsable del defecto. Mediante observación microscópica de las trazas se puede visualizar el punto de incidencia del núcleo y determinar su masa y carga.

En 1984 P. Buford Price y sus colaboradores, de la Universidad de California en Berkeley, construyeron el primero de estos detectores de trazas en el CERN, el laboratorio europeo de física de partículas ubicado cerca de Ginebra. Fabricaron el detector con una película de policarbonato, la cual es sensible a núcleos que poseen más de dos protones. Emplearon, por fuente, haces de núcleos generados en el separador isotópico en línea (ISOLDE) del CERN. El ingenio ISOLDE produce muchos tipos de rayos, cada uno de los cuales contiene núcleos con el mismo número de nucleones y proporciones diferentes de neutrones y protones. Para los experimentos de radiactividades exóticas cas Price y sus colaboradores utilizaron haces de núcleos con 222, 223 o 224 nucleones. Los haces se dirigieron hacia el detector, una pequeña cámara recubierta con película de policarbonato. Cuando los núcleos bombardean una lámina situada en la parte posterior de la cámara, emiten agregados que dejan su huella sobre la película de policarbonato.

Un dispositivo similar condujo al descubrimiento de un segundo tipo de radiactividad exótica, a saber, la emisión de neón 24. Este descubrimiento, que tuvo lugar a comienzos de 1985, fue llevado a cabo por Price y sus colegas e independientemente por S. P. Tretyakova, sus colaboradores y uno de nosotros (Sandulescu) en el Instituto de Dubna. Ambos grupos utilizaron un detector de tereftalato de polietileno, que sólo registra las partículas que poseen más de seis protones. Los investigadores de Dubna observaron la emisión de neón 24, procedente del protactinio 231, uranio 233 y torio 230. El grupo de Berkeley, que descubrió la desintegración del uranio 232 en neón 24, registró un núcleo de neón 24 por cada 500.000 millones de partículas alfa.

En 1986 Price y sus colaboradores de Berkeley desarrollaron un detec-

tor de trazas hecho de vidrio de fosfato para estudiar la desintegración de núcleos en neón, magnesio y silicio. Este detector posee la gran ventaja de registrar únicamente partículas de masa superior a la del oxígeno. El grupo de Berkeley seleccionó el uranio 234 teniendo en cuenta que, de acuerdo con las predicciones de Poenaru y nuestras, dicho núcleo emitiría cantidades significativamente importantes de neón y magnesio. Se expusieron tres detectores durante unos tres meses, observándose 14 sucesos de neón y 3 de magnesio. De esta manera no solamente descubrieron una nueva radiactividad, la emisión de magnesio 28, sino también la existencia de una especie nuclear, el uranio 234, que se desintegraba en tres clases de agregados: helio, neón y magnesio.

Estos agregados, junto con el de carbono 14, constituyen por ahora los únicos detectados. Los emiten varios núcleos a unos ritmos determinados; los períodos de semidesintegración cubren el intervalo comprendido entre $10^{11}$ y $10^{26}$ años. El modelo analítico de fisión superasimétrica ha sido capaz de predecir, dentro de 1,5 órdenes de magnitud, los períodos de semidesintegración de todos los núcleos que emiten estos agregados.

La radiactividad exótica fue un triunfo del modelo bicéntrico de capas. Otro, la predicción de la fisión fría. En este proceso, descubierto recientemente, un núcleo se escinde en dos núcleos "no excitados". Más específicamente, los nucleones que se hallan en los estados de ínfima energía de un núcleo pueden reagruparse de tal manera que formen dos nuevos núcleos en estados de baja energía. Contrariamente al proceso ordinario (caliente), la energía liberada en la fisión fría no excita los núcleos emitidos hasta los estados energéticos superiores. Por consiguiente, los fragmentos nucleares de la fisión fría son más esféricos y menos elongados que los de la fisión ordinaria. De acuerdo con el modelo bicéntrico de capas, un núcleo candidato a la fisión ordinaria posee una pequeña probabilidad de experimentar la fisión fría.

Algunos investigadores han ideado diversos métodos para aislar los sucesos de fisión fría de los incomparablemente más frecuentes de la fisión ordinaria (caliente). En 1981 Claude Signarbieux y sus colegas, del Centro de Investigación de Saclay, realizaron el primer experimento en ese sentido. Bombardearon una muestra con neutrones para inducir la fisión. Utilizando dos detectores en lados opuestos de la muestra, determinaron la masa y energía cinética de los fragmentos.

Poco después, Friedrich Gönnenwein, de la Universidad de Tubinga, y sus colaboradores pusieron a punto otra técnica para la detección de la fisión fría. Se apoyaron en dos espectrómetros de fragmentos de fisión: *Lohengrin* y *Così fan tutte*, del Instituto Laue-Langevin de Grenoble. Los espectrómetros permitieron medir las masas, cargas y energías cinéticas de los fragmentos. Recientemente, Gönnenwein y sus colegas construyeron todavía otro tipo de dispositivo para medir los sucesos de fisión fría. La sensibilidad de este dispositivo es superior en un factor de 10 a la de los otros.

Estos experimentos proporcionaron pruebas indirectas de la fisión fría del uranio 233, uranio 235 y plutonio 234. La cantidad de energía que se libera en la fisión es, como máximo, el valor $Q$, la diferencia entre la energía (masa) del núcleo progenitor y la de sus hijos. Esta energía se distribuye entre el movimiento del núcleo en conjunto y la excitación de los nucleones en su interior. La energía cinética medida experimentalmente en algunos sucesos de fisión resultó igual al valor $Q$. Esta circunstancia implicaba que no quedaba energía disponible para la excitación de los fragmentos y que, por consiguiente, había tenido lugar un proceso de fisión fría.

Los investigadores siguen buscando pruebas que pongan de manifiesto el proceso de la fisión fría. Martin Greiner (hijo de Walter) y Werner Scheid, de la Universidad de Giessen, han predicho que los productos de la radiactividad exótica pueden también emitirse en un estado caliente (es decir, excitado).

El modelo bicéntrico de capas se alzó además con otro triunfo: la predicción de la fisión bimodal. A través del proceso de fisión fría, algunos núcleos pesados se escinden en otros dos núcleos simétricos y duros, en los cuales los nucleones completan determinado número de capas. Debido a que esos núcleos pesados también pueden fisionarse de la manera habitual (pueden escindirse en dos núcleos elongados del mismo tamaño), se dice que exhiben fisión bimodal. Muchos investigadores han estudiado tal proceso; entre ellos, Maruhn, Pashkevich, Möller y Karl Depta, de la Universidad de Frankfurt, James R. Nix, del Laboratorio Nacional de Los Alamos, y Adam Sobiczewski, del Instituto de Investigación de Iones Pesados (GSI) de Darmstadt.

De acuerdo con sus predicciones, la fisión bimodal sería más evidente en la desintegración de los núcleos de fermio 264 y en la de sus parientes nucleares más próximos. La fisión ordinaria del núcleo de fermio 264 originaría dos fragmentos elongados. Su fisión fría produciría dos núcleos esféricos duros de estaño 132. La estructura en capas de este núcleo goza de particular estabilidad, debido a que contiene un número mágico de protones (50) y un número mágico de neutrones (82). En ciertas situaciones se puede considerar que el fermio 264 es una suerte de molécula nuclear compuesta de dos núcleos de estaño.

A lo largo de los cuatro últimos años E. Kenneth Hulet y sus colegas, del Laboratorio Nacional Lawrence Livermore, han desarrollado un detector sensible a los núcleos con más de 100 protones y más de 156 neutrones. Han mostrado la fisión bimodal en el nobelio 258, kurchatovio (rutherfordio) 260 y tres isótopos del mendelevio (258, 259 y 260).

Los experimentos continúan en el campo de las nuevas radiactividades, fusión fría y fisiones superasimétrica y fría. Es de esperar que la sensibilidad de los detectores mejore extraordinariamente gracias a la aplicación de la tecnología actual. También esperamos que la interrelación entre teoría y experimentación permita, de un lado, alumbrar nuevas radiactividades y, de otro, profundizar cada vez más en su conocimiento. Hasta ahora, sólo podemos vislumbrar el mensaje que nos traen estos embajadores.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

HIGH MASS-ASYMMETRY DISTRIBUTIONS OF FISSIONING NUCLEI. A. Sandulescu, H. J. Lustig, J. Hahn y W. Greiner en *Journal of Physics G: Nuclear Physics*, vol. 4, n.º 11, págs. L-279-L-285; 1978.

NEW TYPE OF DECAY OF HEAVY NUCLEI INTERMEDIATE BETWEEN FISSION AND α DECAY. A. Sandulescu, D. N. Poenaru y W. Greiner en *Soviet Journal of Particles and Nuclei*, vol. 11, n.º 6, págs. 528-541; noviembre/diciembre de 1980.

CLUSTER RADIOACTIVITIES. Walter Greiner, Marin Ivascu, Dorin Poenaru y Aurel Sandulescu en *Treatise on Heavy Ion Science*, vol. 8. Dirigido por D. A. Bromley. Plenum Press, 1989.

COMPLEX RADIOACTIVITY. B. Price en *Nuclear Physics A*, n.º 502, págs. 41c-58c; 1989.

TOPICAL REPORT: A NEW RADIOACTIVITY. A. Sandulescu en *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics*, vol. 15, págs. 529-554; 1989.

# Ciencia y sociedad

## *El secreto de Eva*

A tenor de una polémica teoría, parte del bagaje genético de todos los seres humanos procede de una mujer que vivió en Africa hace menos de 200.000 años. La hipótesis acaba de ganar nuevos defensores. También nuevos detractores. Un ambicioso estudio genético abona dicha teoría, en tanto que el registro fósil pone en duda la precisión del reloj molecular que sirve de base.

Los relojes moleculares se mueven por mutaciones acumuladas en varias líneas que han divergido de un tronco ancestral común. Los evolucionistas moleculares calibran este reloj estimando la velocidad de mutación a largo plazo en los casos en que el registro fósil permite conocer el tiempo de divergencia. El reloj puede, entonces, aplicarse a las divergencias sin datar.

A mediados de los ochenta un grupo dirigido por Allan C. Wilson, de la Universidad de California en Berkeley, fundó ese cronómetro en el ADN de los genes de las mitocondrias, orgánulos del citoplasma celular que transforman la energía. Los genes mitocondriales son de exclusivo origen materno. A diferencia de la mayoría de los genes del núcleo, no se da, pues, intercambio de material entre los dos sexos; así, cada vez que una familia llega a una generación totalmente masculina, se termina un linaje mitocondrial. Este tipo de extinciones implicaron con el tiempo la desaparición de la herencia de todas las mujeres excepto la primera, la denominada Eva mitocondrial.

El grupo de Wilson cifra la velocidad de mutación del ADN mitocondrial (ADN mt) en un 2 a 4 por ciento cada millón de años. Basándose en esa estimación, sitúa a Eva en un período que se remonta entre 100.000 y 200.000 años atrás. El equipo construyó un árbol de las diferencias genéticas entre las poblaciones en el que los grupos no africanos son ramas secundarias de una rama principal africana. Eva habría nacido en Africa. Conclusión que se ha visto ahora confirmada por un estudio genético mucho más amplio, realizado por Linda Vigilant y otros colaboradores de Wilson. "Consideramos que los resultados corroboran el origen africano del ADN mt", dice Wilson.

Algunos paleontólogos se oponen a las conclusiones del reloj molecular, en parte porque sugieren que la tribu de Eva se expandió recientemente y de forma rápida por todo el mundo, sin cruzarse con los homínidos indígenas. En una ponencia presentada, en febrero, en el congreso de la Asociación Americana para el Progreso de la Ciencia, Milford H. Wolpoff, de la Universidad de Michigan, defendió que semejante sustitución absoluta no encontraba parangón con los ejemplos históricos de conquistas, sea cual fuera la superioridad tecnológica de los conquistadores. En su opinión, ello implicaría que los hipotéticos guerreros africanos constituyeron una nueva especie, el moderno *Homo sapiens*. Lo que no es posible, ya que el registro fósil nos señala que las modernas diferencias raciales de la especie humana se hicieron patentes cientos de miles de años antes.

Wolpoff y dos colaboradores de Australia y China sacaron sus conclusiones a partir del estudio de los rasgos dentales y faciales de los fósiles humanos de Europa y Asia. Wolpoff indica que analizaron sólo los rasgos que no podían haber evolucionado en respuesta a los cambios locales ambientales y que, por tanto, eran producto de la deriva genética. Wilson no acepta ese razonamiento y objeta que ciertos mecanismos ocultos de selección natural podrían haber originado la semejanza entre los recién llegados y sus predecesores no emparentados. También es crítico frente los datos de Wolpoff. "Está considerando un puñado de rasgos, y nosotros tenemos casi 100", dice Wilson.

Muchos paleontólogos se han sentido agraviados por la usurpación de su propio terreno por parte de los biólogos moleculares. Wilson y Vincent M. Sarich, colaborador suyo, cruzaron la frontera en 1967, cuando su reloj molecular original –basado en las proteínas albúmina y hemoglobina– suponía que el hombre, el chimpancé y el gorila habían divergido a partir de un antecesor común hace apenas 3 o 5 millones de años, más de 10 millones de años más tarde de lo que previamente se supuso. Esta valiente afirmación obligó a los paleontólogos a un profundo reexamen de los restos óseos y a la revisión de los datos relativos a la divergencia.

Wolpoff infravalora el éxito. "Hasta un reloj estropeado señala la hora correctamente dos veces al día", sentencia. "Los biólogos moleculares querían interpretar nuestros fósiles ellos mismos, pero esta vez los resultados se han vuelto en su contra: nuestros fósiles muestran que la hipótesis de Eva no se sostiene."

## *Estaciones en la Luna*

**Grandes observatorios**. La inhóspita y exánime superficie de la Luna podría muy bien ser el mejor emplazamiento del sistema solar interno para el estudio del universo a su alrededor. La ausencia, casi total, de atmósfera, la estabilidad sísmica de la superficie, la mínima interferencia de la luz y las ondas de radio (sobre todo en la cara oculta) y la abundancia de materias primas convierten al satélite en el lugar ideal para instalar observatorios astronómicos refinadísimos.

Los observatorios lunares excederán el poder de resolución de los instrumentos afincados en la Tierra en una cuantía extraordinaria, multiplicándolo tal vez por 100.000. Abrirán una ventana al universo, permitirán la detección de radiofrecuencias bajísimas y darán impulso a nuevas ramas de la astronomía por medio del estudio de las ondas gravitatorias y de los neutrinos.

Mientras no contemos con una base lunar permanente, fijada para el siglo XXI, las observaciones astronómicas provendrán de los satélites en órbita terrestre. De aquí a finales de siglo contaremos con cuatro satélites (los *Grandes observatorios*) que examinarán una amplia fracción del espectro electromagnético: luz, radioondas, rayos X y rayos gamma. Casi todo cuanto los astrónomos saben acerca del cosmos lo han aprendido del estudio de emisiones electromagnéticas de los objetos celestes. Cada porción del espectro electromagnético proporciona información sobre los procesos físicos específicos que producen la radiación de esa energía, o frecuencia, particular.

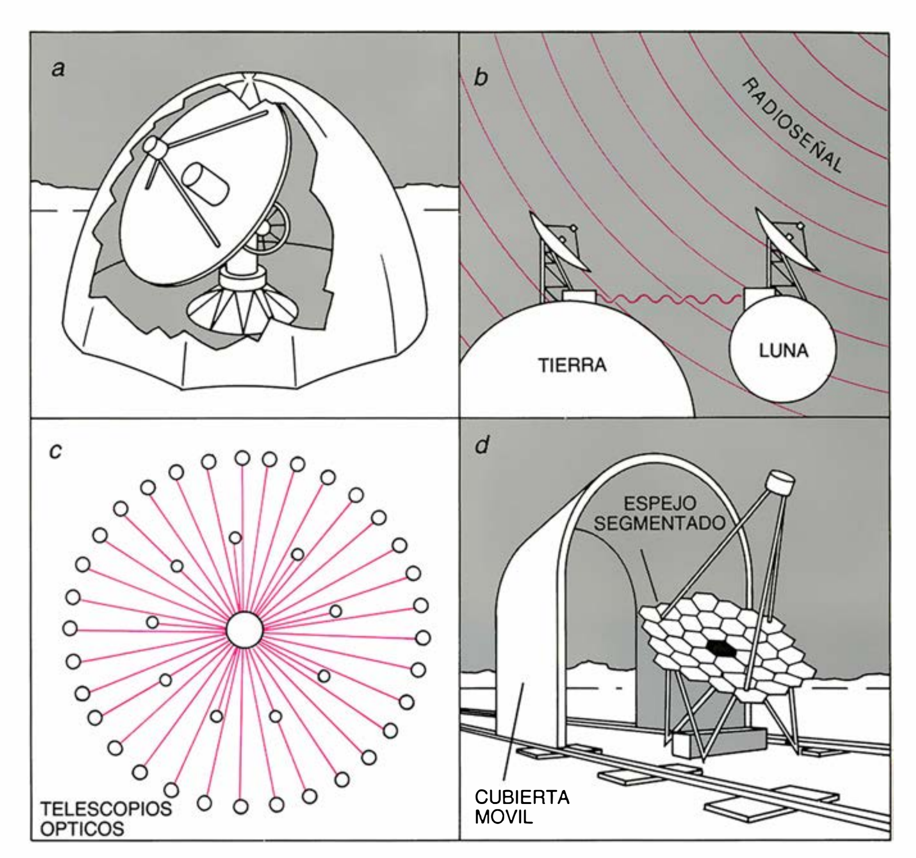
El *Telescopio espacial Hubble*, pionero en la parrilla de salida, explorará el universo a longitudes de onda visibles con una resolución casi 10 veces superior a la de los mayores telescopios basados en la Tierra. El *Observatorio de rayos gamma* se ocupará de la radiación emitidas por procesos de alta energía que tienen lugar alrededor de objetos densos y compactos (estrellas de neutrones y agujeros negros), con una sensibilidad y resolución no alcanzadas. La *Instalación astrofísica avanzada de rayos X* obtendrá imágenes del gas caliente de los cúmulos galácticos, alrededores de galaxias activas y cuásares y atmósferas de las estrellas. Por último, la *Instalación espacial del telescopio in-*

*frarrojo* cartografiará las nubes interestelares frías asociadas a la formación de estrellas y posiblemente de planetas.

No obstante el potencial científico que prometen, los *Grandes observatorios* constituirían, a buen seguro, los últimos de los instrumentos astronómicos colocados en baja órbita terrestre. A esas altitudes rastreras (unos 500 a 600 kilómetros de la Tierra) en las que está la mayoría de los satélites astronómicos, los telescopios tropiezan con graves dificultades. En primer lugar, el entorno está sucio, y la nube de desperdicios en órbita procedentes de anteriores lanzamientos se hace cada año más densa. Se trata, en muchos casos, de objetos de alta velocidad, de varios micrometros, que pueden dañar la óptica e instrumentación, muy sensibles, de un telescopio. En segundo lugar, a esa altura hay todavía polvo y gas en abundancia. El polvo dispersa la luz y crea un fondo de infrarrojo que enmascara las emisiones que vienen de las fuentes infrarrojas celestes más débiles. El movimiento orbital de los satélites, a alta velocidad, excita los átomos de la enrarecida atmósfera superior, creando líneas de emisión a longitudes de onda ópticas que pueden enmascarar o confundir las observaciones astronómicas.

En tercer lugar, el rozamiento atmosférico hace que los satélites en baja órbita terrestre vayan acercándose lentamente hacia la Tierra. El problema se agrava durante los periodos de alta actividad solar, cuando la intensidad de la radiación solar ultravioleta dilata la atmósfera superior de la Tierra. En cuarto lugar, la propia Tierra es fuente de radiación enmascarante. La luz reflejada por la Tierra puede dispersarse en el interior del telescopio y degradar la calidad de las observaciones. Además, el campo magnético terrestre genera ruido de baja frecuencia en el dominio de radioondas, que excede con mucho la intensidad de las fuentes extraterrestres. Por culpa de ello, los observatorios en órbitas bajas tendrán dificultades para detectar y cartografiar las radioondas de baja frecuencia de longitudes de onda kilométricas, única porción del espectro electromagnético que queda por observar.

Finalmente, los satélites en órbita próxima a la Tierra experimentan rápidas variaciones térmicas y gravitatorias que limitan el tamaño, y con él la resolución y sensibilidad de los telescopios que pueden situarse en tales órbitas. Esas variaciones deforman los espejos y las antenas parabólicas de radio, impidiéndoles producir imágenes óptimas y desperdiciando valioso tiempo de observación mientras el instrumento se estabiliza. La eliminación de las deformaciones térmicas exige la construcción de elaboradas pantallas o máscaras.




*1. TELESCOPIOS LUNARES. Habrá pantallas para proteger las superficies delicadas, tales como la antena de este telescopio de ondas milimétricas, de los choques de meteoritos* (a). *Un radiotelescopio lunar, conectado con otro terrestre, tendrá el poder de resolución de una antena de 400.000 kilómetros de anchura* (b). *Se propone enlazar 42 telescopios ópticos para formar un conjunto de 10 kilómetros de diámetro; las señales recibidas por éste se recogerán y procesarán en un equipo central* (c). *Un telescopio de 16 metros que se ha sugerido también presentará un espejo articulado y una montura sencilla para facilitar la construcción; una cubierta móvil protegerá la óptica* (d).

Los gastos de transporte aumentan con la distancia a la Tierra, pero la tasa de aumento disminuye con la lejanía: viajar desde la Tierra a la órbita geosincrónica requiere 2,6 veces el combustible necesario para viajar hasta una órbita terrestre baja, pero precisa sólo un 50 por ciento adicional para llegar a la Luna. Más importante es que el entorno para astronomía mejora con la distancia; la Luna es un emplazamiento óptimo para realizar observaciones astronómicas.

**La esperanza, en la Luna**. Nuestro satélite ofrece una enorme plataforma natural donde construir grandes estructuras. Los telescopios de gran apertura y la muchedumbre de pequeños telescopios enlazados electrónicamente en la Luna conducirán a una mejora sustancial de las observaciones astronómicas. De las señales procedentes de un par de telescopios enlazados se dice que "interfieren", y así tales dispositivos enlazados se denominan interferómetros. Mediante una cuidadosa combinación de las señales, se alcanza la misma resolución con un par de pequeños telescopios que con un telescopio cuyo diámetro sea la distancia entre la pareja. En órbita terrestre, los interferómetros requirirían gigantescas plataformas o complicados y costosos sistemas para mantener la posición de todos los elementos telescópicos; en la Luna, tales instrumentos se podrían instalar en la superficie.

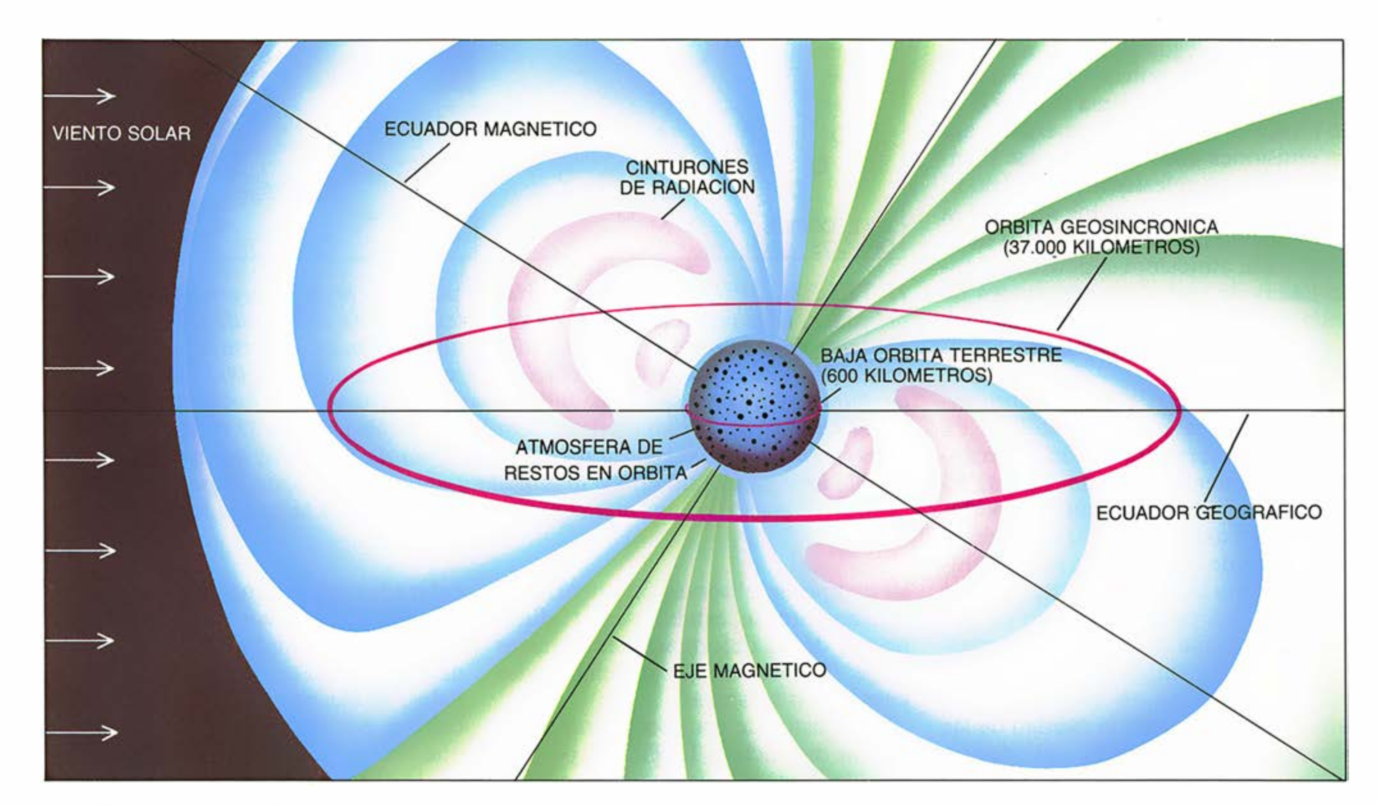
Montar estructuras en el entorno de gravedad reducida de la Luna es más fácil que hacerlo en el ambiente de ingravidez de la órbita terrestre. La construcción puede fundarse en las técnicas desarrolladas en la Tierra, con la ventaja de que la menor atracción gravitatoria permite allí montar dispositivos mayores. Ferhat Akgul, Walter H. Gerstle y Stewart W. Johnson han elaborado los planos de un radiotelescopio lunar construido con materiales de grafito y resinas sinté-

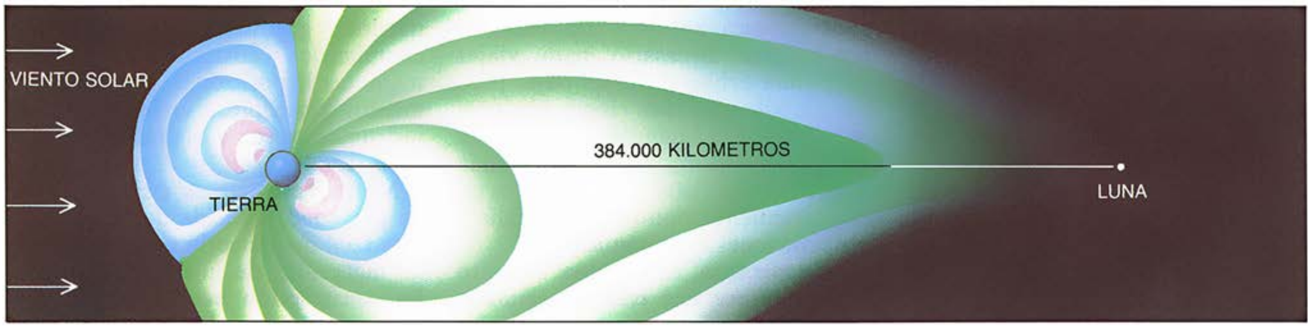
ticas. No encuentran obstáculo práctico para preparar antenas parabólicas completamente orientables de 500 metros de diámetro o espejos de 16 metros de anchura para observar la luz visible y la radiación infrarroja (cuyas longitudes de onda son algo mayores que las de la luz visible).

La plataforma lunar goza de gran estabilidad. La energía de un suceso sísmico es allí 100 millones de veces menor que la de un episodio típico en la Tierra, y los temblores lunares producen movimientos del suelo de aproximadamente una milmillonésima de metro. Tal estabilidad es una ventaja para los interferómetros ópticos, que requieren que la distancia entre los elementos telescópicos en un sistema enlazado se conozca con precisión de una fracción de la longitud de onda de la luz, una diezmillonésima de metro.

La Luna ofrece, además, una vista sin obstáculos de casi todas las radiaciones. La atmósfera lunar es virtualmente inexistente: la masa de la totalidad de su atmósfera es igual a la del aire contenido en una cancha de baloncesto. Cuando la Luna describe su órbita, un hemisferio está siempre mirando en dirección opuesta a la de la Tierra. En esta cara, la masa de la Luna actúa a modo de una gigantesca pared, bloqueando las fuentes de interferencia naturales y antropogénicas que hacen las radioobservaciones de baja frecuencia imposibles en la Tierra y difíciles en órbita terrestre. La cara oculta es el único sitio del sistema solar interno que es, al mismo tiempo, lo bastante grande y suficientemente abrigado para abordar esas frecuencias.

Hay más aspectos favorables. James D. Burke señala que algunos cráteres cerca de los polos lunares aparecen constantemente en sombra; se cree que la temperatura en esos lugares es de unos 70 kelvin. La mayor parte de los detectores astronómicos se han de enfriar a esa temperatura o por debajo de ella para reducir el ruido térmico de la electrónica de los instrumentos. Daniel F. Lester sugiere que los polos lunares pueden ser puntos ideales para instalar telescopios infrarrojos; el helado entorno enfriaría pasivamente no sólo la electrónica y los detectores sensibles al infrarrojo, sino también las estruc-




*2. LOS RESIDUOS Y EL RUIDO son la plaga de los satélites astronómicos en órbita terrestre. Los restos que rodean la Tierra, generados por el hombre, amenazan a los satélites con choques devastadores. La tenue atmósfera superior crea un rozamiento que despide luz indeseada y hace que la órbita del satélite se degrade. Incluso a mayores alturas, la luz de la Tierra arruina las observaciones astronómicas. Los cinturones de radiación de la Tierra crean ruido y entorpecen el funcionamiento de los instrumentos. Las perspectivas para la astronomía son mucho mas brillantes en la Luna: lejos del agitado entorno que rodea a la Tierra, es suficientemente grande para actuar como escudo, protegiendo de la radiación natural y antropogénica emitida por la Tierra.*

turas propio del telescopio, que, a temperaturas más altas, emiten radiación infrarroja.

La Luna tiene abundancia de materias primas que podrían procesarse para dar aluminio, cerámica y vidrios superresistentes para la contrucción de telescopios. Para James D. Blacic, el ambiente lunar, muy seco, facilitaría la creación de vidrios con resistencia a la tracción comparable a la del acero y con bajos coeficientes de dilatación térmica. Tales vidrios servirían para espejos ópticos y ciertas estructuras de los telescopios. La minería, el refinado y el procesado en la Luna ahorrarían el transporte de componentes desde la Tierra.

**Dificultades a superar**. La Tierra tiene un campo magnético que desvía los rayos cósmicos cargados y las partículas del viento solar, alejándolas de la superficie y del espacio inmediato. No hay campo comparable en la Luna; deberán tomarse precauciones para proteger a los seres humanos y a los equipos electrónicos de la peligrosa exposición a la radiación.

La Luna sufre el bombardeo constante de pequeños meteoritos. En la Tierra, esas partículas se desintegran en la alta atmósfera; en la Luna, desprovista de ella, llueven sobre la superficie a velocidades que varían desde 10 hasta varias decenas de kilómetros por segundo. Asimismo, la lenta rotación de la Luna (una vez cada 27,3 días) y la falta de atmósfera crean fuertes y rápidas variaciones de temperatura: desde 100 kelvin por la noche hasta 385 durante el día. Habrá que minimizar los esfuerzos de origen térmico a que estarán sometidos los telescopios lunares. Una acertada selección de materiales compuestos (como el grafito aglomerado), que resisten la dilatación y la contracción, pueden evitar que las variaciones térmicas sean un serio problema.

Una vigorosa base lunar –que incorpore actividades de minería, fabricación y lanzamientos– podría proporcionar importantes recursos, pero podría también contaminar la atmósfera de la Luna. Bajo circunstancias extremas, las actividades mineras podrían generar una atmósfera lunar de larga vida y opaca a la radiación ultravioleta, que entorpecería la actividad astronómica.

Para nuestra fortuna, la contaminación lunar estaría principalmente confinada a la vecindad de las instalaciones de minería o lanzamientos. Los átomos atmosféricos serían rápidamente absorbidos por el suelo lunar o arrastrados por el viento solar (chorro de partículas procedente del Sol). Los observatorios a más de 10 o 100 kilómetros de la instalación minera no sufrirían la acción contaminadora.

El primer observatorio lunar será modesto. Sépase, sin embargo, que hasta un telescopio óptico de un metro de diámetro instalado en la Luna podría realizar valiosos estudios; en ausencia de la deformante atmósfera, tal telescopio tendría una resolución de alrededor de 0,1 segundo de arco, mejor que la del mayor instrumento asentado en nuestro planeta.

Los telescopios lunares tendrán acceso a las radiaciones ultravioleta e infrarroja (que presentan longitudes de onda algo más cortas y algo más largas que las de la luz visible, respectivamente); podrían, pues, ocuparse de un amplio dominio de fenómenos astronómicos. Un telescopio proyectado para abarcar un gran campo de visión sería ideal para construir un mapa de la totalidad del cielo que mostraría objetos más débiles y detalles más finos que el del Palomar Sky Survey, que sirve de referencia. Vigilaría también la actividad solar y avisaría a los astronautas de inminentes explosiones solares de rayos cósmicos.

Michael Zeilik propone dedicar un telescopio óptico de un metro a la tarea de seguir las variaciones de brillo de las estrellas variables y los cuásares. Libre de la brillante y turbulenta atmósfera terrestre, esas mediciones requerirán menos del 1 por ciento del tiempo de exposición necesario en la Tierra y podrán realizarse continuamente, sin los ciclos cortos de día y noche, ni las interrupciones debidas al tiempo que entorpecen tales observaciones en la Tierra.

Otros instrumentos sencillos y bien adaptados al entorno lunar son los detectores de pulsos de rayos gamma y los monitores de la variabilidad de rayos X. Vigilarían el cielo en busca de los pulsos de emisiones de rayos gamma, que duran de 0,1 a 80 segundos y se elevan cientos o miles de veces por encima del tranquilo fondo. Se sabe muy poco sobre los emisores de pulsos de rayos gamma, por la razón principal de que los astrónomos no han podido localizar e identificar contrapartidas ópticas de ellos. Los detectores de rayos gamma pueden localizar los objetos con aproximación de sólo algunos grados. Una estación monitora de rayos gamma en la Luna, acoplada a otras dispersas en el sistema solar, podría situar esas fuentes con la precisión de segundos de arco comparando los tiempos de llegada de los brotes a los diversos detectores. Los monitores de variabilidad de rayos X podrían estudiar las emisiones refulgentes que se cree asociadas a discos calientes de materia que ciñen las estrellas de neutrones y los agujeros negros.

Los astrónomos conocen una razón poderosa para construir un observatorio lunar: estudiar las radioondas de baja frecuencia (con longitudes de onda de alrededor de un kilómetro), observables sólo desde la cara oculta de la Luna. Durante los últimos veinte años, a medida que las nuevas técnicas han permitido observar los rayos X celestes y la radiación infrarroja, se han descubierto nuevas clases de fuentes y sorprendentes fenómenos físicos. Las radiofrecuencias por debajo de unos 30 megahertz constituyen la última porción inexplorada del espectro electromagnético. Esas frecuencias resultan inaccesibles desde la superficie terrestre porque la atmósfera superior refleja la radiación incidente.

**Detectores de muy baja frecuencia**. Esa ventana al cosmos se podría abrir mediante la construcción de un conjunto de detectores de muy baja frecuencia (VLFA). El ingenio constaría de unas 200 antenas dipolares, cada una parecida a una antena de recepción de televisión de un metro de largo. Las antenas, distribuidas en círculo en una región de 20 kilómetros de anchura, serían sensibles a frecuencias entre unos 50 kilohertz y 30 megahertz. Ciertos grupos de antenas se correlacionarían electrónicamente para "apuntar" el conjunto a diferentes fuentes sin mover los elementos. Las señales procedentes de cada grupo se retransmitirían a un punto central para su correlación y calibración; los datos se podrían entonces analizar por ordenador para revelar el brillo superficial (y con ello la estructura) de la fuente particular que produce la radiación.

La construccion del VLFA planteará varias dificultades técnicas. El conjunto se habrá de situar en la cara oculta, muy distante de cualquier base habitada. Podría encargarse la misión a vehículos robot, capaces de atravesar una zona de 20 kilómetros de anchura de terreno irregular, que situarían las antenas en las posiciones óptimas. Por culpa del tiempo de retraso de las comunicaciones, bien con el otro lado de la Luna o con la Tierra (unos tres segundos hasta la Tierra y desde ella), los vehículos deberán llevar programas autónomos de inteligencia artificial. La transmisión de los datos desde cada dipolo a una estación central requerirá el desarrollo de un complicado transmisor-receptor multiplexado de radio o láser.

Gracias al VLFA los astrónomos podrán observar los procesos que aceleran las partículas de alta energía en las fulguraciones solares, lo que per-

mitiría elaborar un sistema de aviso anticipado de las explosiones solares de alta energía; esto complementaría el trabajo del monitor solar óptico de un metro. Los investigadores podrán estudiar el flujo de electrones de alta energía en los campos magnéticos planetarios, en restos de supernovas, en púlsares y en radiofuentes extragalácticas que son sede de poderosos pero todavía mal conocidos procesos astrofísicos. El VLFA podrá también explorar la estructura de los medios interplanetario e interestelar. Por último, las observaciones a bajas frecuencias permitirán a los astrónomos vislumbrar los sutiles procesos de baja energía que acompañan a los comportamientos de las galaxias y cuásares.

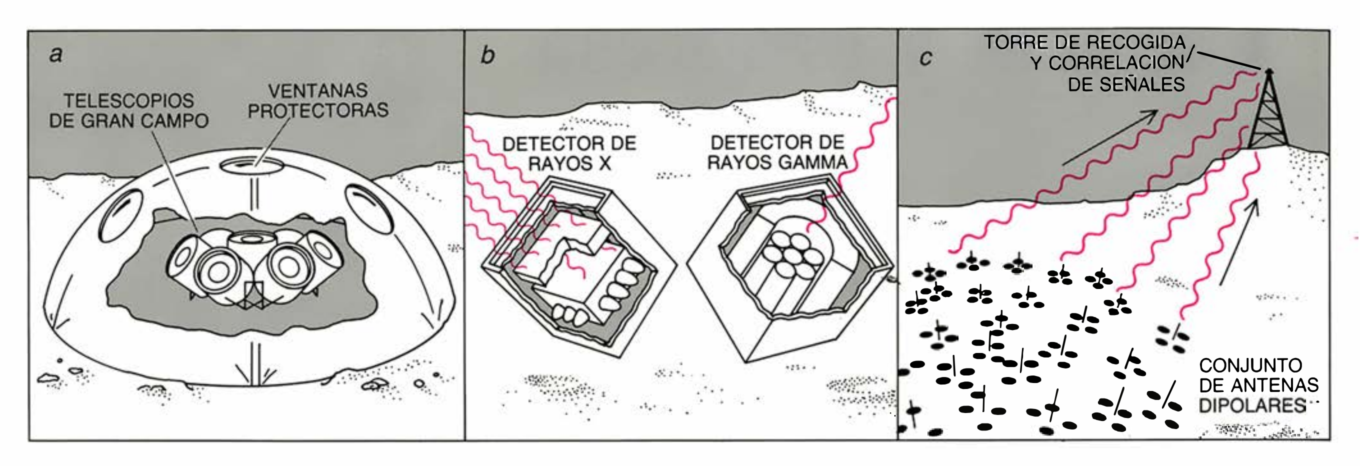
Pierre Bely y Garth D. Illingworth han pergeñado un telescopio óptico e infrarrojo de 16 metros en la Luna, que podría detectar objetos 40 veces más débiles que los accesibles al telescopio espacial. El espejo colector de la luz, de 16 m de diámetro, estaría constituido por bloques hexagonales. El soporte del telescopio sería una montura sencilla y ligera constituida por tres pares de patas; unos actuadores controlados por ordenador en las patas compensarían los posibles movimientos de los cimientos del telescopio. J. Roger P. Angel prevé que el telescopio detectaría planetas semejantes a la Tierra alrededor de otras estrellas a través de la busqueda de la señal de emisión del ozono atmosférico.

**El proyecto LOUISA**. Un proyecto de astronomía óptica mucho más ambicioso sería situar un gran interferómetro óptico. EL *Telescopio espacial Hubble* decuplicará sólo la resolución de los telescopios terrestres. El llamado *Conjunto lunar de síntesis optica-ultravioleta-infrarroja* (LOUISA), propuesto por Jack O. Burns, Nebojsa Duric, G. Jeffrey Taylor y Stewart W. Johnson, multiplicará por 100.000 la resolución del mayor telescopio afincado en la Tierra.

LOUISA sería una serie de telesco-



*3. ASTRONOMIA LUNAR, esperanza de un mejor conocimiento del universo. Los monitores de variabilidad de rayos X (*a*) y los detectores de pulsos de rayos gamma (*b*) explorarán los cielos en busca de misteriosas fuentes de pulsos rápidos de radiación de alta energía. Grupos de telescopios ópticos y ultravioleta de gran campo, aquí apantallados (*c*), pueden al fin revelar la verdadera naturaleza de esas fuentes. Los grupos de antenas dipolares (*d*), interconectados, formarán el conjunto de muy baja frecuencia, que será capaz de detectar radioondas de baja energía emitidas por las fulguraciones solares, restos de supernovas y galaxias activas.*




*4. APLICACION DE LA TECNICA DE PUNTA a la astronomía asentada en la Luna. Los conjuntos de instrumentos que vigilen la totalidad del cielo estarán automatizados* (a). *Los monitores de rayos X y gamma* (b) *incorporarán detectores perfeccionados, hechos de germanio y revestimientos especiales para mejorar la resolución. Robots autoguiados ayudarán a situar el conjunto de muy baja frecuencia en la cara oculta de la Luna; cada antena estará conectada a un equipo central de recogida de datos por medio de fibras ópticas o complicados radiotransmisores* (c).

pios ópticos, electrónicamente conectados y situados en un círculo de 10 kilómetros de diámetro. No se puede construir en la Tierra un interferómetro óptico de esta clase a causa de la turbulencia atmosférica y de los movimientos sísmicos en la corteza. En baja órbita terrestre, los gradientes gravitatorios sobre una línea base de 10 kilómetros requerirían un reposicionamiento constante, muy delicado y muy caro, de cada uno de los elementos del telescopio.

En febrero de 1989, una cincuentena de expertos en interferometría óptica se reunieron en sesiones de trabajo en la Universidad de Nuevo México y se pusieron de acuerdo sobre un proyecto preliminar de LOUISA. El conjunto estaría formado por dos anillos concéntricos de telescopios con espejos de 1,5 metros de diámetro. El anillo exterior poseería 33 telescopios y tendría 10 kilómetros de diámetro; el anillo interior, con nueve telescopios, mediría medio kilómetro de diámetro. La luz recibida en cada telescopio se transmitiría a una estación central donde se procesaría y almacenaría. LOUISA observaría un amplio dominio de longitudes de onda, desde el ultravioleta (0,1 micrometro) hasta el infrarrojo próximo (1 micrometro).

LOUISA es el telescopio que encierra mayor dificultad técnica, pero es también el que ofrece mayor rentabilidad científica. Con una resolución de una cienmilésima de segundo de arco, podría detectar planetas similares a la Tierra en órbita alrededor de estrellas próximas (y tal vez determinar su composición atmosférica); éste es el primer paso para averiguar la viabilidad de vida en otras partes de nuestra galaxia. En nuestro propio sistema solar, LOUISA podría proporcionar imágenes de planetas y asteroides con un nivel de detalle que excedería incluso al de las imágenes proporcionadas por la sonda Voyager. Los accidentes en la superficie de las estrellas se podrían ver directamente, revelando así la relación entre la actividad en el Sol y en otras estrellas y posibilitando el estudio de sutiles movimientos en la superficies estelares; estos movimientos proporcionan información sobre las estructuras internas de las estrellas e indicaciones sobre su evolución. Los astrónomos podrían explorar la dinámica del núcleo galáctico, ver discos de materia tragados por agujeros negros y estrellas de neutrones y sondear la estructura de galaxias destrozadas. En el área de la cosmología, LOUISA mediría el movimiento propio de los cuásares y revelará cualquier irregularidad en la expansión del universo.

Otro instrumento, un radiointerferómetro Tierra-Luna, extendería la técnica de interferometría a una base que se prolongaría desde la Tierra hasta la Luna, creando un radiotelescopio de 384.000 kilómetros. Tal aparato tendría una resolución de una cienmilésima de segundo de arco a una frecuencia de 10 gigahertz.

Frank D. Drake ha propuesto la construcción de una gigantesca radioantena parabólica, de quizá 1500 metros de diámetro, en un cráter lunar. Una antena de este tamaño podría realizar observaciones de alta sensibilidad de las radioemisiones del hidrógeno neutro en el espacio. Paul Gorenstein ha postulado la creación de un conjunto agrupado de telescopios de rayos X en la Luna que mejoraría la resolución y sensibilidad de la *Instalación astrofísica avanzada de rayos X.*

La contrucción de un observatorio en la Luna ayudaría también a extender la astronomía al dominio, en gran parte inexplorado, de las ondas gravitatorias y los neutrinos. Las ondas gravitatorias fueron predichas por la teoría de la relatividad general, de Einstein; su detección suministraría una sólida corroboración de la teoría, así como de los modelos de formación de galaxias.

Se cree que las ondas gravitatorias se generan por el colapso del núcleo estelar que tiene lugar durante una explosión de supernova y posiblemente mediante exóticos procesos de alta energía relacionados con las cuerdas cósmicas que se habrían formado en el primitivo universo. La intensidad predicha de esas ondas es tan baja que, para detectarlas, se requerirían detectores estables de más de 1000 kilómetros de longitud.

Los neutrinos abundan en el universo, si no son la forma dominante de materia. Pueden también guardar la clave para la comprensión de las reacciones termonucleares en el Sol, que no parecen comportarse según lo predicho. Difíciles de detectar porque interaccionan debilísimamente con la materia, en la Tierra su observación se complica a causa de los constantes chubascos de partículas de alta energía (entre ellas, neutrinos) que se forman cuando los rayos cósmicos chocan contra la atmósfera. Michael Cherry y Kenneth Lande han hecho notar que el fondo de neutrinos de la Luna es menos de la milésima parte de de la Tierra, lo que convierte a la Luna en un lugar privilegiado para la detección de neutrinos.

# Ciencia y empresa

## *Dinerosaurios*

A los chavales les entusiasman los dinosaurios. Lo mismo les sucede a los directores de los museos, sobre todo si esas criaturas extintas se mueven, gruñen y atraen multitudes que pagan. Las presiones financieras, de la mano de la curiosidad, han creado mercado para un creciente rebaño de dinosaurios de cartón y microcircuitos. Los propios paleontólogos se hallan embobados, observa Frank H. Talbot, conservador del museo de la Institución Smithsoniana, en Washington.

Los dinosaurios entraron en los museos de los EE.UU. ofrecidos por Dinamation, una empresa californiana de San Juan de Capistrano. Su fundador vio por primera vez especímenes de fabricación japonesa en una convención de parques de atracciones. Convenció al fabricante, Kokoro, para que le permitiera comercializar tales bestias en los EE.UU. Dinamation comenzó a crear sus propios dinosaurios en 1986; Kokoro abrió una oficina en Los Angeles a fines de 1987.

Ambas compañías ofrecen sus modernísimas criaturas prehistóricas tanto a la venta como en alquiler. El alquiler de camadas de dinosaurios robots ha traspasado las barreras oceánicas y se ha convertido en un negocio rentable, no reñido con el fin didáctico de los centros de exhibición. Se ha llegado incluso a reproducir yacimientos paleontológicos y se diseñan programas que recrean sus condiciones de vida.

Aunque viven del negocio de las exhibiciones, tanto Dinamation como Kokoro han contratado paleontólogos de primera fila para que los mantengan al día en los descubrimientos. Incorporan éstos en los nuevos modelos, e incluso reacondicionan los dinosaurios ya en servicio. "Claro que cambiamos las placas del Stegosaurio", recuerda Anthony Bland, de Dinamation, cuando los paleontólogos llegaron a la conclusión de que las crestas dorsales del reptil eran alternas y no continuas. Hace tres años, las colas de los dinosaurios mecánicos dejaron de arrastrarse, después de que los investigadores hallaran que unos huesecillos, al parecer evolucionados a partir de vértebras, debieron sostener tales apéndices. Y, por supuesto, el Brontosaurio ya no existe. El vegetariano de largo cuello, que tiene ahora una cabeza más ancha, es realmente un Apatosaurio.

Aunque las mejoras en la reconstrucción de esqueletos da lugar a nuevos y mejores robots, los fabricantes no se apuran por lo que los paleontólogos desconocen. "La piel fósil es parda", dice Jun Shimizu, de Kokoro, "pero nadie sabe a ciencia cierta su color real". Las manchas púrpura de su Paquicefalosaurio ("cabeza que topa") no son, sin embargo, enteramente caprichosas. Los investigadores creen ahora que esta familia de dinosaurios estaba relacionada con las aves y pudo haber tenido brillantes colores.

Salvo en dos especies, nadie sabe los sonidos que los dinosaurios emitían. Los Parasauriólofos podrían haber producido un sonido como el de un bajón, ya que su gran cresta córnea debía resonar. El Apatosaurio, que carecía de cuerdas vocales, silbaría como la serpiente, reptil igualmente desprovisto de ellas. Pero tales ruidos sibilantes podrían asustar a los niños, cree Shimizu. Sus Apatosaurios robot emiten un bramido bajo y gutural. "No olvidemos que esto es también un espectáculo, y la gente tiene que divertirse con lo que ve", se justifica. Según cálculos de la empresa, decenas de millones de personas asisten, anualmente y en todo el mundo, a esas exhibiciones.

¿Hasta cuándo durará esa fascinación? Bastante todavía. Los dinosaurios vivieron durante 140 millones de años, una longevidad que puede enseñar bastante a los humanos.

## *Atmósfera cargada*

El mes que viene se reunirán en Londres más de 40 países para someter a examen la evolución del plan sobre reducción de emisión de halocarburos (CFC), los productos químicos que destruyen el ozono y se emplean como refrigerantes y para fabricar aislantes y disolventes. Se presume más que probable la prohibición absoluta de los halocarburos en muchos países para el año 2000.

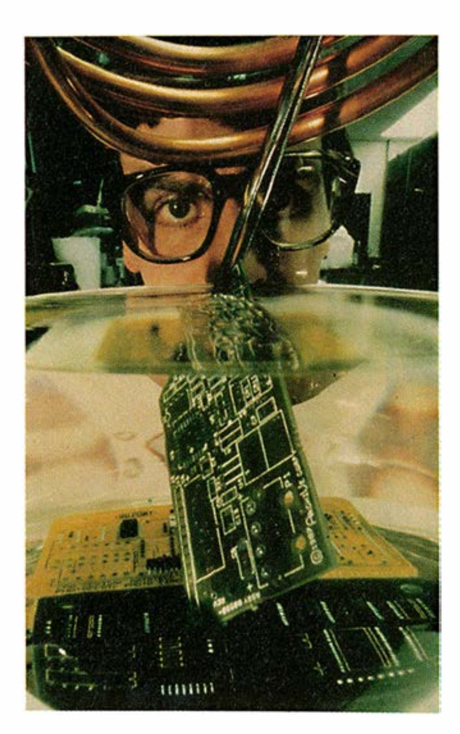
Mucho menos previsible es conocer hasta qué punto las enmiendas a la Ley del Aire Limpio condicionarán las vías alternativas al caso de halocarburos que están ensayando los industriales. Algunos de esos compuestos empobrecen el ozono, aunque con menos avidez que sus predecesores. Esa atmósfera de incertidumbre en que se mueven irrita a los fabricantes de halocarburos y preocupa a los usuarios; pero también exige que competidores y clientes se determinen a cooperar.

Corren especial peligro los hidroclorofluorcarburos (HCFC), que destruyen ozono a razón de sólo el 2 al 10 por ciento de la velocidad con que lo hacen los CFC. La Ley del Aire Limpio modificada podría prohibirlos a partir del año 2015. Como los CFC, los HCFC mantienen el frío de ciertos aparatos (neveras) durante largos periodos gracias a la estabilidad que proporciona el cloro. Estabilidad que, también, capacita a los compuestos para catalizar las reacciones que destruyen el ozono de la estratosfera. Algunos fabricantes han empezado a producir pequeñas cantidades de hidroclorofluorcarburos y esperan el resultado.

Mientras el destino de los HCFC está en el aire, la mirada se dirige a sustancias inocuas para el ozono: los hidrofluorcarburos (HFC). DuPont comenzará a suministrar cantidades comerciales de un HFC (llamado 134a) hacia finales del año en curso. ICI y Allied Signal lo producirán en 1991 o 1992. El rendimiento refrigerante de los HFC es menor que el de los productos que contienen cloro; dicho de otro modo, no nos podemos limitar a "rellenar" con ellos los sistemas actuales. General Motors lleva trabajando desde 1986 en pruebas de nuevos compresores para los equipos de acondicionamiento de aire de sus automóviles. Confía introducir el 134a en los modelos que saque al mercado en 1994.

La sustitución de los disolventes basados en CFC para desengrasar ciertos componentes y limpiar los sensores electrónicos que se usan en los sistemas de los automóviles es más difícil, reconocen en el sector. No acaban ahí las complicaciones del uso de los CFC. Las pruebas toxicológicas son mucho más severas que cuando los CFC se introdujeron, en el decenio de 1930. Las pruebas, que incluyen la evaluación de la neurotoxicidad y efectos sobre la reproducción, están logrando que las empresas se comporten de manera insólita: cooperando.

A través del programa sobre "Pruebas de toxicidad de las opciones alternativas a los halocarburos (PAFT)", creado en enero de 1988, catorce empresas internacionales han reunido fondos para someter a prueba los cinco principales candidatos y "amigos del ozono". "Cualquiera puede imaginarse cuáles son esas alternativas; no hay secretos",



*1. AGENTES DE LIMPIEZA para tarjetas de circuitos impresos, se están desarrollando en los laboratorios de DuPont; habrán de sustituir a los halocarburos.*

explica George M. Rusch, presidente de toxicología del PAFT. Aunque los resultados provisionales parecen prometedores, no habrá dictamen oficial hasta 1993 o 1994. Algunas empresas han madrugado ya en el reciclado de los CFC.

## *Hombres y ratones*

Los anticuerpos monoclonales, en los que se vio una suerte de misiles dirigidos biológicos desde su descubrimiento en 1975, están, acercándose al blanco convertidos, sin embargo, en medicamentos. De manera muy semejante a los propios anticuerpos del organismo, que atacan a los invasores extraños, los monoclonales, obtenidos en grandes cantidades en los laboratorios, se pueden unir a determinadas substancias. Prendidas a ellos, tales substancias se tornan impotentes y son destruidas por el sistema inmunológico. Gracias a su capacidad de apuntar a un solo blanco, los anticuerpos monoclonales ocupan ya un lugar de privilegio en el diagnóstico. Ahora se están empleando para tratar enfermedades agudas causadas por células y toxinas en circulación.

Es probable que la Administración de Alimentos y Medicamentos de los EE.UU. (FDA) apruebe, en el curso de los próximos 18 meses, tres anticuerpos monoclonales con fines terapéuticos: uno contra el rechazo del injerto de médula ósea y dos productos rivales para tratar el choque séptico, infección bacteriana letal. Las compañías que producen tales específicos usan procesos de fabricación distintos, lo que les confiere ciertas ventajas y plantea también problemas potenciales.

El único específico monoclonal que ha llegado hasta ahora al mercado es el Orthoclone OKT3, de la empresa Ortho Pharmaceutical, recetado para el rechazo del trasplante de riñón: se aprobó en 1986. El OKT3 impide que las células T circulantes ataquen el órgano injertado, que es un cuerpo extraño. El OKT3 deja tranquilas a las células T inmaduras, que se desarrollan considerando "propio" el nuevo riñón.

Ese mismo propósito de engañar a las células T guía al próximo producto monoclonal que aprobará la FDA. El medicamento, fabricado en los laboratorios Xoma de Berkeley, se prescribe para la enfermedad del injerto-contra-anfitrión, proceso en que la médula ósea trasplantada rechaza a su hospedante enviando células T que atacan los tejidos del paciente.

El XomaZyme-CD5 Plus, que así se llama el fármaco, etiqueta dichas células T desbocadas para su destrucción. Xoma está ensayando ya drogas contra la artritis reumatoidea, diabetes independiente de la insulina y enfermedades intestinales inflamatorias.

Tras esos específicos anti-rechazo, guardan cola dos anticuerpos monoclonales para el tratamiento del choque séptico, enfermedad bacteriana responsable de la muerte anual de unos 85.000 pacientes hospitalizados en los EE.UU. Los antibióticos al uso matan las bacterias, pero son las endotoxinas, o venenos, que desprenden esos organismos lo que convierte la infección en fatal. Los anticuerpos monoclonales se prenden de la endotoxina y avisan así al organismo para que se deshaga de ella.

Dos compañías —Xoma y Centocor—, compiten por un mercado que podría facturar cientos de millones de dólares. (Es probable que los medicamentos cuesten entre 150.000 y 200.000 pesetas por tratamiento.) La diferencia entre los enfoques de una y otra compañía reside en los procedimientos y el origen de las células que fabrican la droga. O lo que es lo mismo, es asunto de ratones y hombres.

Centocor trabaja con células de bazo humano productoras de anticuerpos cuyos poseedores fallecieron de choque séptico. En cambio, Xoma inyecta en células de bazo de ratones endotoxinas de bacterias para que dichas células liberen anticuerpos contra la misma. Unas y otras células devienen inmortales al fusionarse con una célula de crecimiento ilimitado: un tumor en el caso de Xoma, un virus en el de Centocor. De esa fusión resulta una célula híbrida, un hibridoma, que segrega anticuerpos monoclonales.

El proceso de creación del hibridoma se realiza una sola vez. La fase siguiente consiste ya en la síntesis industrial de drogas. Xoma inyecta sus hibridomas en ratones vivos, donde proliferan y se acumulan en el fluido de la cavidad abdominal del ratón. Luego, se extraen y purifican. Centocor cultiva sus células en tanques para cosechar los anticuerpos.

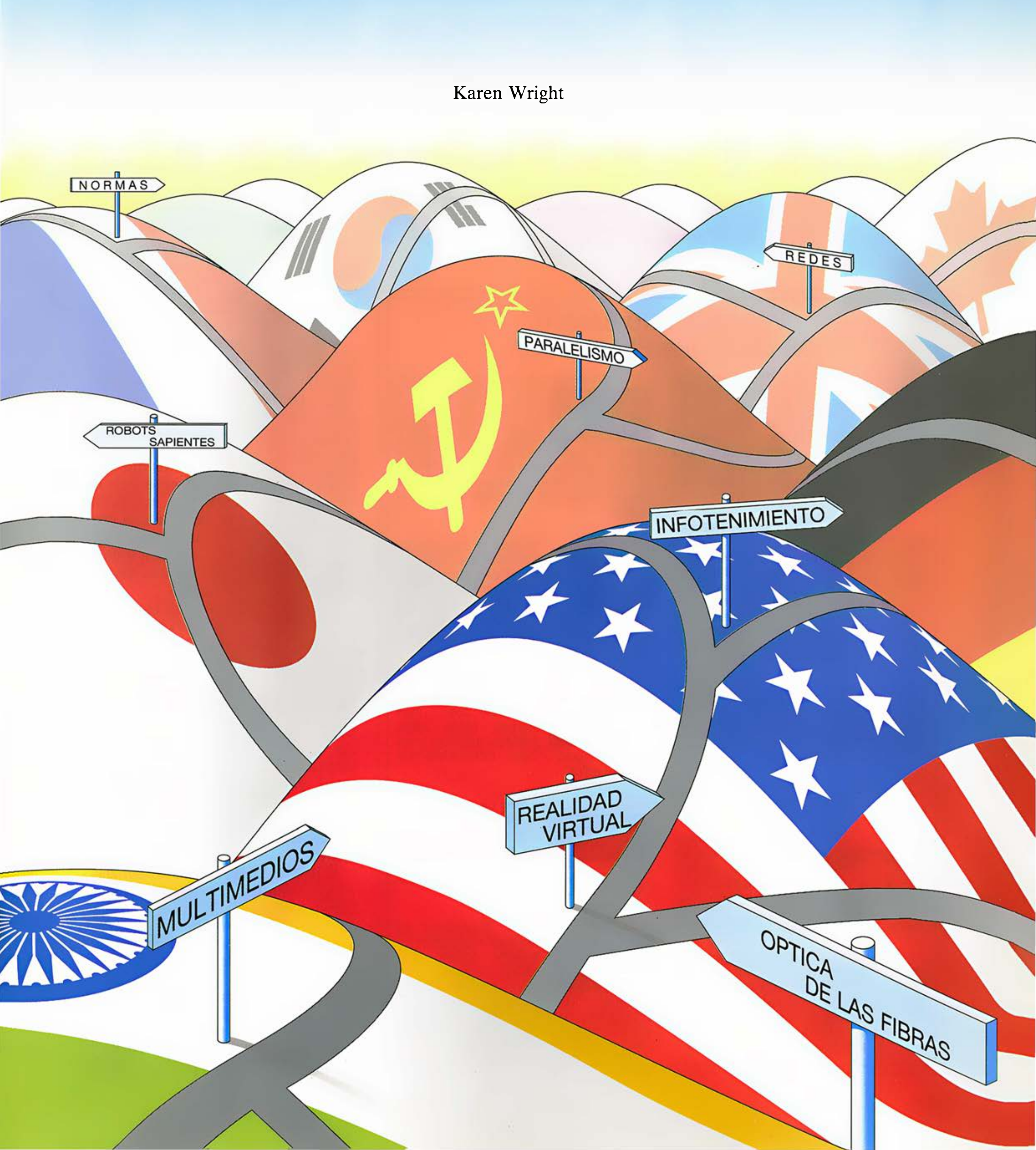
Las proteínas sintetizadas por el ratón difieren de las humanas. Por ello, los pacientes que reciben un medicamento obtenido en ratones podrían elaborar sus propios anticuerpos contra el mismo. "Si tal ocurre, la vez siguiente que se administre un monoclonal de ratón no podrá realizar su trabajo. El cuerpo lo eliminará casi de inmediato", explica Curtis I. Scribner, jefe de la unidad de la FDA encargada de los ensayos clínicos de los anticuerpos monoclonales. Xoma dice que la mitad de sus pacientes han presentado una respuesta negativa a los anticuerpos de ratón (HAMA). "La FDA sopesará los riesgos y los beneficios", apostilla Scribner, "pero no veo que la HAMA pueda retrasar la aprobación de específico alguno".

Centocor cree que un anticuerpo humano irá mejor en los humanos. La compañía hace caso omiso de una crítica frecuente contra los anticuerpos monoclonales humanos: su carestía y dificultad de producción y almacenamiento, especialmente en grandes cantidades. Para la empresa, su capacidad técnica particular ha resuelto ya tales problemas. Pero siempre existe el riesgo de que el producto final pudiera transmitir al paciente oncogenes o virus procedentes del proceso de inmortalización.

Una tercera aproximación a los anticuerpos monoclonales combina los puntos fuertes de los sistemas humano y múrido. "La industria farmacéutica se dirige claramente hacia los anticuerpos humanizados", según Ivor Royston, director de inmunología clínica de la Universidad de California en San Diego. La ingeniería proteínica remodela los anticuerpos de ratón para asemejarlos a los humanos, o funde los componentes humano y múrido. Con el tiempo, este trabajo de taller debe producir mejores anticuerpos.

# Hacia la aldea planetaria

Karen Wright



*... transcurrido más de un siglo de tecnología eléctrica, hemos extendido el sistema nervioso central que nos es propio hasta abrazar en su totalidad al globo terráqueo, aboliendo a la vez el tiempo y el espacio por lo que a nuestro planeta concierne.*

Un cuarto de siglo ha transcurrido desde que la pluma de un oscuro profesor de la Universidad de Toronto escribiera estas palabras. En un tratado de título *Understanding Media*, Marshall MacLuhan profetizaba que la conciencia humana acabaría refulgiendo a escala mundial, constituida en una sola comunidad, a la que él mismo acabaría tildando de "aldea global". ¿Quién osaría hoy poner en tela de juicio la profecía de MacLuhan? El mundo ha sido testigo "en tiempo real" de cómo los pueblos de Europa Oriental arrojaban por la borda decenios de su historia. Las sacudidas de terremoto en San Francisco hicieron estremecerse a millones de aficionados al béisbol. Una anárquica red informática interconecta a usuarios de 35 países. Las operaciones de la bolsa de valores de Tokio pueden amargarle el desayuno a un agente de cambio en Nueva York.

Y las notas anteriores no constituyen seguramente sino la obertura de toda una serie de cambios mucho más drásticos. El mundo desarrollado está experimentando los efectos de la convergencia de la tecnología informática y de las comunicaciones, cuyo impacto transformador, al decir de los expertos, va a rivalizar con la sustitución de la fuerza muscular por la potencia de las máquinas. Una hibridación manifiesta ya en toda una gama de artilugios, como los equipos de transmisión facsímil, los cajeros automáticos, magnetoscopios domésticos, contestadores automáticos, discos compactos, teléfonos celulares, vídeojuegos y televisión de alta definición.

La tecnología que hoy se está incubando en los laboratorios industriales y universitarios hará que los artefactos utilizados en nuestros días nos parezcan rudimentarios y primitivos. Con el propósito de averiguar qué nos tienen reservado, hice una visita a los obreros que están construyendo la carretera conducente a la aldea global. Ellos me llevaron más allá de la pantalla táctil y el ratón, me transportaron al otro lado del espejo de la terminal de ordenador y me condujeron al país de las maravillas del mañana.

## Comercio à la modem

Lo mismo que casi todas las revoluciones, también ésta hunde sus raíces en la economía. Los amores entre la tecnología informática y las comunicaciones están a un tiempo guiando a, y siendo conducidos por, un sector servicios que se desarrolla a pasos de gigante. Tal vez no resulte sorprendente que los servicios engullan tan glotonamente la tecnología de información: muchos de ellos jamás hubieran llegado a existir de no ser por ella. Empero, no faltan expertos que sostengan que la noción de economía de servicios enmascara una transición más profunda, que lleva de una economía basada en recursos materiales a una economía en la que casi toda la riqueza está generada por una esencia intangible: la información.

Los expendedores de tal tecnología se han tomado a pecho los análisis anteriores. "Hace años nos preguntábamos a qué negocio nos estábamos dedicando", dice Robert W. Lucky, director ejecutivo de los Laboratorios AT&T & Bell. "Al cabo", prosigue Lucky, "se llegó a la conclusión de que nuestro ramo era MGI: movimiento y gestión de información. Vea usted, ya no somos una empresa de comunicaciones. Ahora somos movimiento y gestión de información". Lucky repite el sonsonete como un mantra.

El jefe de Lucky, Arno A. Penzias, vicepresidente de investigación de los Laboratorios Bell, lo describe como un movimiento "desde las cosas al pensamiento". No todo el mundo tiene la convicción de que sea así. "Hay que ser prudente al utilizar la frase 'economía de la información'", dice James Quinn, de Darmouth College. "La información tan sólo es interesante en la medida en que afecta a otras cosas." Quinn prefiere hablar

## VOCABULARIO BASICO DE LA ALDEA PLANETARIA

**TRABAJO COOPERATIVO**: Tecnología que permite a personas ubicadas en lugares distantes ponerse en relación y manejar unos mismos documentos y archivos a través de enlaces de voz, imagen y datos; también se denomina trabajo cooperativo asistido por ordenador (CSCW).



**FLOPS**: Acróstico de "floating-point operations per second", esto es, operaciones en coma flotante por segundo. Es una medida de la rapidez con que un ordenador puede efectuar operaciones con números que no son enteros. Tales cálculos poseen importancia crítica en las aplicaciones que describen el mundo físico.

**SER HUMANO**: Dispositivo analógico de procesamiento y almacenamiento de información, cuya anchura de banda es de unos 50 bits por segundo. Los seres humanos sobresalen en el reconocimiento de formas y regularidades, pero son lentos en los cálculos secuenciales.



**HIPERMEDIOS**: Medios de comunicación cuyos contenidos se encuentran estratificados o dispuestos en forma no lineal, al objeto de representar distintos niveles de detalle. Compárese con "multimedios".



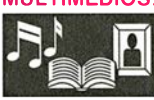
**INFOTENIMIENTO**: Tecnología informática y de comunicaciones concebida con el fin de educar o enseñar entreteniendo. Llamada a veces "entreducación"; véase también "multimedios".

**RDSI**: Abreviatura de red digital de servicios integrados (ISDN, en inglés); un datoducto de comunicaciones capaz de transportar a un tiempo señales de datos y de voz. Las normas básicas de la red RDSI consienten dos canales de voz más un canal de datos con capacidad de 16.000 bits por segundo.

**DISCERNOBOT**: Auxiliar o sirviente informático que actúa sin necesidad de instrucción explícita, destinado a determinar las prioridades o explorar la información, a proteger datos confidenciales o a inutilizar "virus" informáticos.



**MULTIMEDIOS**: Presentaciones basadas en ordenador que combinan dos o más medios, como texto, gráficos, escritura y señales de audio y vídeo. Compárese con "hipermedios"



**VIDEOTEX**: Cualquiera de los diversos servicios de información y venta al pormenor orientados hacia el consumidor doméstico, materializado en ordenadores personales y terminales especializados.

**REALIDAD VIRTUAL**: Sucedáneo de realidad o ambiente intangible creado mediante sistemas informáticos y de comunicaciones. "Virtual" suele denotar las simulaciones de objetos físicos generadas por ordenador; se habla así de "una sala virtual" o de "un circuito virtual".

de "economía de servicios", frase que a su juicio tiene mayor significado, porque –dice– la información y la tecnología de la información representan tan sólo un subconjunto de una pléyade de factores que contribuyen a la productividad del sector servicios.

### Un rayo caído del cielo

Ciertos acontecimientos recientes hacen pensar que, con economía de la información o sin ella, la gente no está preparada ni dispuesta a tragarse la tecnología de la información como un todo. Algunos esfuerzos por entretejer la tecnología informática con la de comunicaciones e intercalarla en la urdimbre de la vida ordinaria han sufrido serios reveses, como, por ejemplo, muchos intentos de videotexto. Los observadores afirman que estas "arrancadas en falso" son síntomas de falta de sensibilidad en las industrias informáticas y de telecomunicaciones. Mitch Kapor, fundador de Lotus Development Corporation y presidente de ON Technology, Inc., la denomina "falta de sensibilidad en el diseño. El problema de lograr que los ordenadores les resulten útiles a las personas en tanto que aparatos de comunicaciones no es problema de ingeniería", explica Kapor. "Se trata de un problema de diseño. A los ingenieros se les enseña a eliminar los factores subjetivos. Pero en este caso son precisamente los factores subjetivos los que desempeñan un papel crítico."

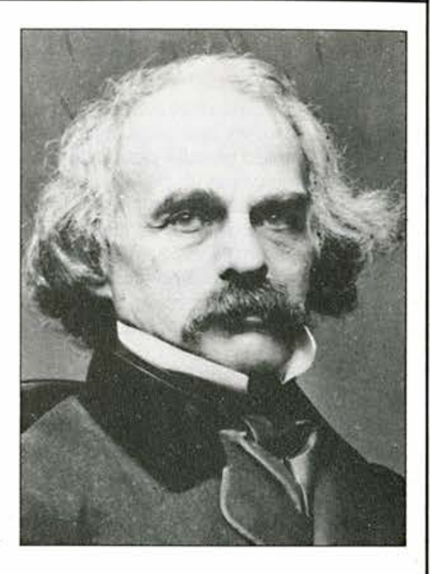
Las compañías informáticas han dedicado muchos años y muchos cientos de millones a tratar de hacer los ordenadores más accesibles y "amistosos"; han recurrido a "interfases" basadas en "ventanas gráficas" (perdónese la expresión) y otros artificios, que han permitido a toda una población de individuos informáticamente vírgenes sacar partido de las máquinas tanto en su trabajo como para su recreo. A pesar de lo cual, los ordenadores siguen intimidando a muchos consumidores cultos, e incluso a los expertos pueden parecerles exasperantemente lentos. Por ese motivo, patrocinadores de la investigación tan estimables como IBM, Apple, Xerox y Bell Communications Research (llamada Bellcore, para abreviar) están reclutando antropólogos, sociólogos y psicólogos, en un esfuerzo por construir tecnología de la información que los usuarios puedan hacer suya.

Lucy Suchman, antropóloga de plantilla en el Centro de Investigación de Xerox en Palo Alto (más conocido por PARC), observa al personal de la sala de operaciones de unas líneas aéreas en el Aeropuerto Internacional

## Ya lo vieron venir...

**Nathaniel Hawthorne, 1851**
*The House of the Seven Gables*

"¿Es hecho probado... que, merced a la electricidad, el mundo de la materia se ha convertido en un gran nervio, que vibra a lo largo de millares de millas en un estupefacto punto del tiempo? ¿Quizás el redondo globo del mundo es más bien una inmensa cabeza, un cerebro, es instinto con inteligencia? ¿O deberíamos decir que es en sí mismo un pensamiento, que no es nada sino pensamiento, que no es ya la sustancia que nosotros lo creíamos?"



**Aldous Huxley, 1925**
*Those Barren Leaves*

"Reconforta pensar", dijo Chelifer, "que la civilización moderna está haciendo cuanto puede por restablecer el régimen tribal, pero a una escala



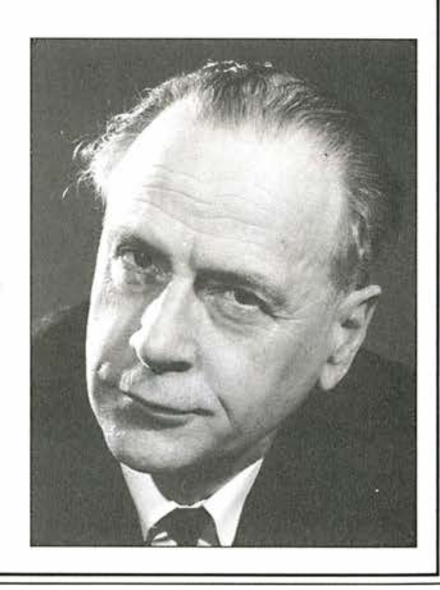
enorme, a escala nacional e incluso internacional. La baratura de la imprenta, los teléfonos inalámbricos, los trenes, automóviles, gramófonos y demás, están haciendo posible la consolidación de tribus, compuestas no por unos pocos millares sino por millones... Puede que dentro de pocas generaciones el planeta entero esté cubierto por una vasta tribu americanoparlante, compuesta por innumerables individuos, todos ellos pensando y actuando de igual manera, como los personajes de una novela de Sinclair Lewis..."

El señor Cardan hizo con la cabeza un gesto afirmativo al tiempo que succionaba su veguero. "Cabe esa posibilidad, desde luego", concedió. "Es casi más que probable, pues no veo ni de lejos verosímil que en el plazo de unos pocos millares de años podamos engendrar una raza de seres con inteligencia suficiente para formar una sociedad estable no tribal..."

"Tal vez fuese necesario un rasero ligeramente inferior", sugirió Chelifer.

---

Marshall McLuhan acuñó el término "aldea planetaria" en el decenio de 1960, pero futuristas y visionarios venían jugueteando desde mucho antes con la idea de una sociedad mundial e interconectada. McLuhan le dijo a su amigo y colaborador Bruce R. Powers que la frase se le ocurrió mientras consideraba el párrafo de Hawthorne. Cuando McLuhan publicó *Understanding Media* en 1964 su visión de tal mundo era optimista, pero con el paso de los años fue tornándose cada vez más suspicaz y receloso ante la "implosión" de las comunicaciones. En *The Global Village*, cuya producción tomó Powers a su cargo tras fallecer McLuhan en 1980, los autores dedican nueve páginas a las 'satisfacciones' del 'nuevo tribalismo' y 38 a sus 'inconvenientes'. –*K.W.*



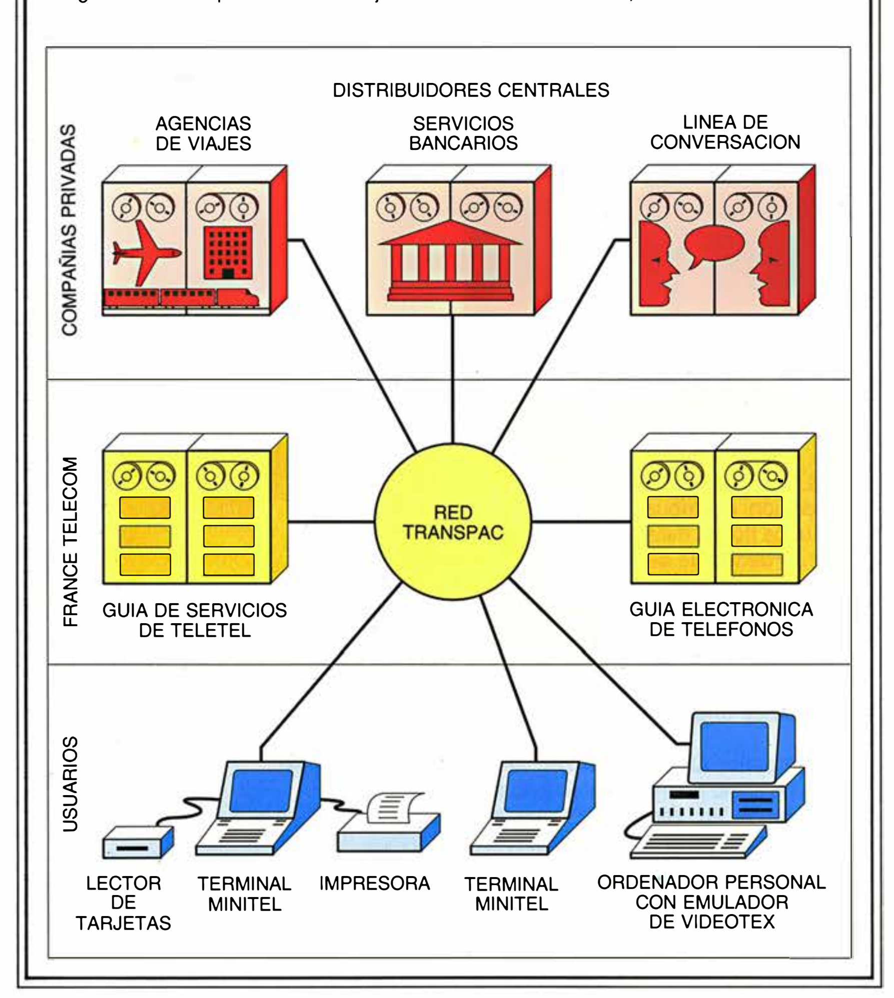
## *Vive le terminal*

El monopolio francés de telecomunicaciones, de propiedad estatal, ha instalado una red de videotex que es, a juicio de casi todos los entendidos, la única del mundo que ha constituido un auténtico éxito popular. La red Teletel facilita al 18 por ciento de los hogares franceses un portillo de acceso a 12.000 servicios de información electrónica, dato del que ninguna otra red del mundo puede ufanarse. A través de los terminales "Minitel" de la red Teletel, terminales que France Telecom proporciona sin cargos para el usuario, cinco millones de abonados telefónicos pueden gestionar sus finanzas, solicitar plaza en aviones y hoteles, encargar artículos de catálogos informatizados y conversar unos con otros a través de la *messagerie* (un servicio que ha dado aliento a una *messagerie rose*, donde se anuncian servicios de compañía y se depositan mensajes eróticos).

"No hay en toda Europa nada que pueda compararse en escala a Teletel", afirma Graham Thomas, de la unidad de ciencias políticas de la Universidad de Sussex. Gran Bretaña y Alemania Federal, que pusieron en servicio programas propios de videotex más o menos al tiempo que Francia, no han llegado cada uno a rebañar 200.000 suscriptores. En los Estados Unidos, un sistema de videotex más reciente, promovido conjuntamente por IBM y Sears, ha conseguido aproximadamente el mismo número de suscriptores; en Japón, el producto llamado Capitan ha corrido todavía peor suerte, con menos de 100.000 terminales vendidos después de diez años.

¿Por qué ha tenido éxito Francia donde otros se han estrellado? Posiblemente, por lo muy sencillo que resulta convertirse en iniciado en Teletel. Los potenciales suscriptores tan sólo han de presentarse en una oficina de France Telecom y solicitar un terminal; lo único que sacrifican a cambio es el derecho a recibir una vez al año una gruesa guía telefónica. A un costo de 37 céntimos de franco por minuto (unas 8 pesetas), France Telecom consigue que el usuario poco animado se decida, al tiempo que se ahorra los gastos de impresión y distribución de las guías telefónicas.

Para atraer al comercio y a los usuarios domésticos a integrarse en la red, France Telecom está promoviendo productos y servicios nuevos, como un lector inteligente de tarjetas, que hace al Teletel menos susceptible de fraudes. No obstante, los esfuerzos del servicio por conseguir suscripciones en las grandes compañías podrían resultar fallidos. No existen normas internacionales para el Teletel, y ahora, con la unificación del mercado europeo asomando por el horizonte, Teletel corre el peligro de quedar tecnológicamente atrapado en un callejón sin salida.—*Fred Guterl, Londres*




de San José, tratando de averiguar de qué forma extraen información concreta de entre un caótico aluvión de mensajes recibidos por radio, teléfono, ordenador, texto escrito y vídeo. En sus 10 años de investigación ha identificado dos ingredientes de la tecnología capaces de ganarse el entusiasmo del público, a saber: familiaridad y versatilidad.

Suchman señala que toda tecnología requiere aprendizaje. La conducción de un automóvil, por ejemplo, no constituye un acto intuitivo. Pero como la gente está familiarizada con esa tecnología, afirma Suchman, "su experiencia les dice que los beneficios van a merecer el esfuerzo. En el caso de la tecnología informática, los beneficios son desconocidos." Y con frecuencia, prosigue, la tecnología es demasiado rígida para producir beneficio alguno. "Los usuarios han de poder acomodar un diseño a sus condiciones específicas", hace notar. Suchman piensa que el proceso de diseño mejoraría si los ingenieros y programadores observasen la forma en que se utilizan sus equipos después de que sus aparatos salgan del laboratorio. En la forma actual, la tecnología se presenta como "un rayo caído del cielo".

### El paradigma de "la persona en su totalidad"

El Centro PARC puede ufanarse de un largo historial de pensamiento creador: el ordenador personal, la impresora láser y las redes de área local tuvieron en él su nacimiento; entre sus asesores se cuenta un antiguo monje benedictino. Lo mismo en éste que en otros laboratorios salta a la vista el creciente interés que está mereciendo el comportamiento humano, puesto de manifiesto en toda una variedad de proyectos. A lo largo y ancho de toda la industria informática, los investigadores están construyendo "interfases" que tratan de aprovechar las formas naturales de expresión humana: el habla, el gesto, la escritura manuscrita, por sólo mencionar unas cuantas. Los investigadores de Apple llaman a este enfoque "paradigma de la persona en su totalidad".

"Mi sueño es poner la potencia del ordenador a disposición de la mayoría de la gente del mundo", declara el psicólogo Richard Bolt, director de un grupo de trabajo en interfases del esotérico Laboratorio de Medios de Comunicación del Instituto de Tecnología de Massachusetts. "La mayoría de la gente no sabe escribir a máquina ni conectarse como usuario de un ordenador, pero casi todo el mundo sabe hablar y señalar". Bolt

dirigió la creación de la Sala de Medios, una especie de ambiente digital que reconoce el habla y el gesto. "Todavía estamos esforzándonos por cumplir las promesas que George Lucas y Walt Disney hicieron largo ha", dice quejumbroso uno de los moradores del Laboratorio. Pero después sonríe abiertamente. "Aunque eso está bien".

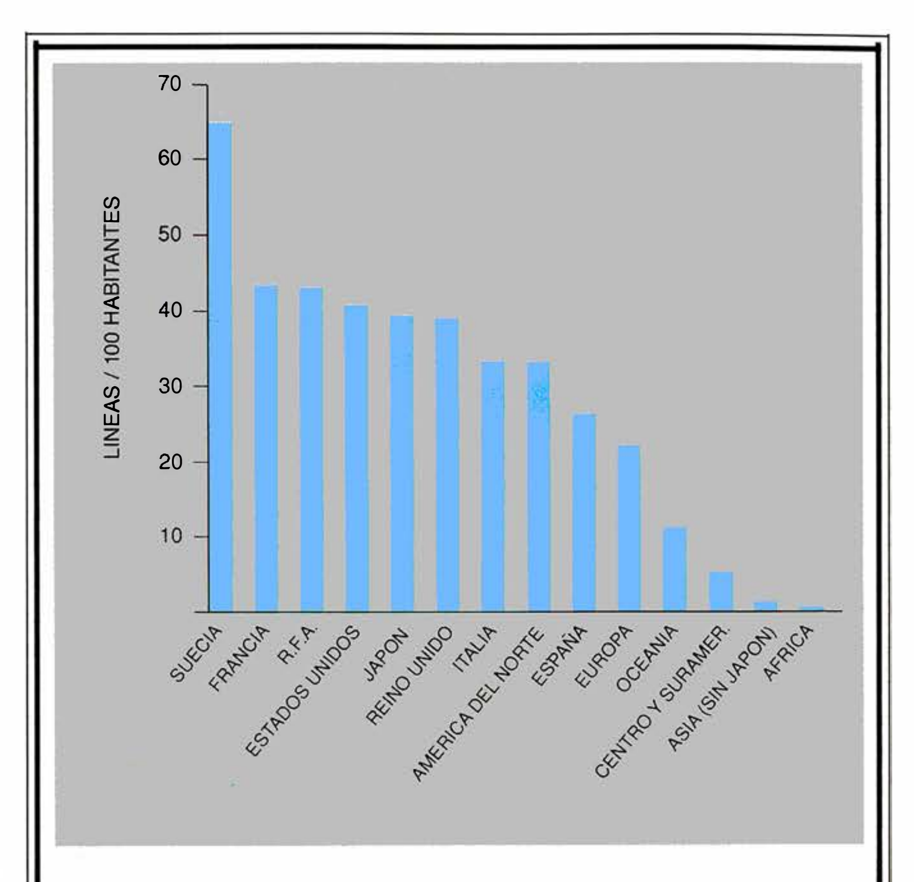
El Laboratorio fue fundado en 1982 por Nicholas Negroponte, en la presunción de que habría de llegar el día en que la computación, las tareas editoriales y la radio y la teledifusión quedarían eliminadas y superadas por una "presencia informática". Hasta ahora, Negroponte ha convertido a su fe a 60 compañías, haciéndolas patrocinadoras suyas, lo que supone una aportación anual y conjunta de 13 millones de dólares a la causa (unos 1700 millones de pesetas).

En años recientes, los principales proveedores de equipos informáticos, de soporte lógico, de electrónica de consumo y de equipos de comunicaciones han lanzado o reforzado sus propios programas de investigación sobre procesamiento, síntesis y reconocimiento del habla, amén del reconocimiento de la escritura manuscrita y de los gestos o ademanes. Ya se utiliza síntesis del habla en contestadores telefónicos automáticos; algunos automóviles pueden informar verbalmente a sus propietarios de que está bajo el nivel de aceite; Canon fabrica por 500 dólares una pantalla digitizadora que permite al usuario escribir con un lápiz especial sobre la propia pantalla. Sony saca al mercado un sistema de reconocimiento de la escritura manuscrita, capaz de interpretar el repertorio estándar de 1800 caracteres chinos utilizados por los japoneses.

## Una sala a la que se le puede hablar

Los propios ordenadores están haciéndose más diestros y adeptos al habla. Existen ya máquinas, dotadas de vocabularios de varios centenares de términos, capaces de reconocer palabras aisladas casi igual de bien que los seres humanos. El problema, claro está, consiste en hacer que estos ordenadores comprendan lo que tales palabras significan.

A lo largo de 10 años, los Laboratorios Bell han estado enseñándole a un ordenador a tomar telefónicamente reservas de viaje por avión. Los progresos logrados son impresionantes. El Sistema de Información de Aerolíneas (AIS) dispone de un vocabulario de 132 palabras y comprende más de 12.000 millones de frases. AIS




## Panorama desde España

La marcha hacia la "aldea global" dista mucho de ser uniforme en el conjunto de los países y regiones geográficas de nuestro planeta. Su efectividad requiere no sólo la abundante disponibilidad de puntos de acceso por parte de los usuarios, sino también unos canales de tráfico adecuados. Mientras que el primer requisito se está haciendo realidad en los últimos años con la ubicua proliferación de ordenadores del tipo personal (acompañados de complementos tales como el modem), la interconexión se realiza fundamentalmente a través de la red telefónica disponible. El gráfico indica la tasa de líneas telefónicas por cada cien habitantes en diveras áreas geográficas y países en 1987. Puede verse que hay grandes variaciones y que España se encuentra a una distancia todavía importante de los países europeos más avanzados, al tiempo que Europa en su conjunto mantiene una diferencia similar respecto de Estados Unidos y Japón (debida fundamentalmente a los países "del sur"). Aunque en 1988 y 1989 Telefónica de España, S.A. ha incrementado el número de líneas instaladas, el rápido crecimiento de la demanda apenas ha hecho descender la lista de espera, que se situaba en más de 500.000 líneas a comienzos del presente año.

Otro rasgo importante es cualitativo. La red telefónica tradicional (llamada "conmutada") no se previó inicialmente para estos usos, por lo que sólo permite velocidades de transmisión y volúmenes de tráfico bajos. Su sustitución por otra más avanzada de tecnología digital se realiza progresivamente, con una cobertura actual de esta última de aproximadamente un 20 por ciento. Se ofrecen los servicios Iberpac (que usa la conmutación de datos por paquetes), Ibercom (comunicaciones entre empresas) e Ibertex (el videotex español) y se está comenzando la implantación de la red digital de servicios integrados (RDSI), con una posible entrada parcial en funcionamiento a lo largo de 1991. Esta nueva red, además de permitir mayores velocidades y capacidades de transmisión, aumenta el rendimiento de cada línea al ofrecer la posibilidad de que se realicen hasta 30 comunicaciones diversas simultáneas por una misma línea.

Estos desarrollos ofrecen un gran interés para la comunidad científica, siempre interesada en el rápido intercambio de información a través de las fronteras. De hecho, las redes de interconexión por medio de ordenadores y líneas telefónicas cuentan ya con gran tradición entre centros académicos y de investigación, primero en ámbitos locales y nacionales, para convertirse luego en internacionales. En España, el programa IRIS (Interconexión de Recursos Informáticos), incluido en el Plan Nacional de Investigación Científica y Desarrollo Tecnológico desde 1988, se ocupa de avanzar en este terreno, utilizando la red Iberpac, para ofrecer servicios de utilización remota de ordenadores, intercambio de textos y mensajes (correo electrónico) y transferencia de ficheros entre sistemas. IRIS es miembro de la asociación europea RARE (Reseaux Associés pour la Recherche Européenne), conectándose así a las redes de otros países de Europa y América.—*Manuel Gamella, Madrid*

aprende a reconocer voces oyendo a un entrenador pronunciar 200 frases (el entrenador tiene que pronunciar cada una de las 132 palabras). Al igual que la mayoría de los sistemas de reconocimiento del habla, para poder alcanzar velocidades prácticas, AIS recurre a sistemas de procesamiento en paralelo: descompone la frase en piezas que sea posible analizar separada y simultáneamente.

El ordenador AIS consta de 24 procesadores digitales de 32 bits, cada uno de los cuales puede realizar ocho millones de operaciones en coma flotante por segundo (8 megaflops, en la jerga; FLOPS es acrónimo de "floating-point operations per second"). No trate el lector de emular esta proeza en su domicilio, pues le haría falta el equivalente de 2000 ordenadores personales.

David Roe, de los Laboratorios Bell, me hizo una exhibición. Le dice a AIS el punto de destino y el día y la hora a los que desea salir; el ordenador toma nota, presenta por escrito lo que piensa que Roe le ha dicho y responde adecuadamente de palabra. Personalmente, cuando he de comer en vuelo prefiero comida vegetariana, así que le pido a Roe que encargue una. Roe duda; al parecer, "vegetariana" no es una de las 132 palabras. "Quisiera una comida vegetariana", pronuncia Roe con voz tensa ante el micro del teléfono. Quisiera el vuelo cero ocho a Seattle, responde AIS por escrito. "Al parecer le gustan los ochos", se disculpa Roe. Bueno, todos tenemos derecho a nuestros gustos.

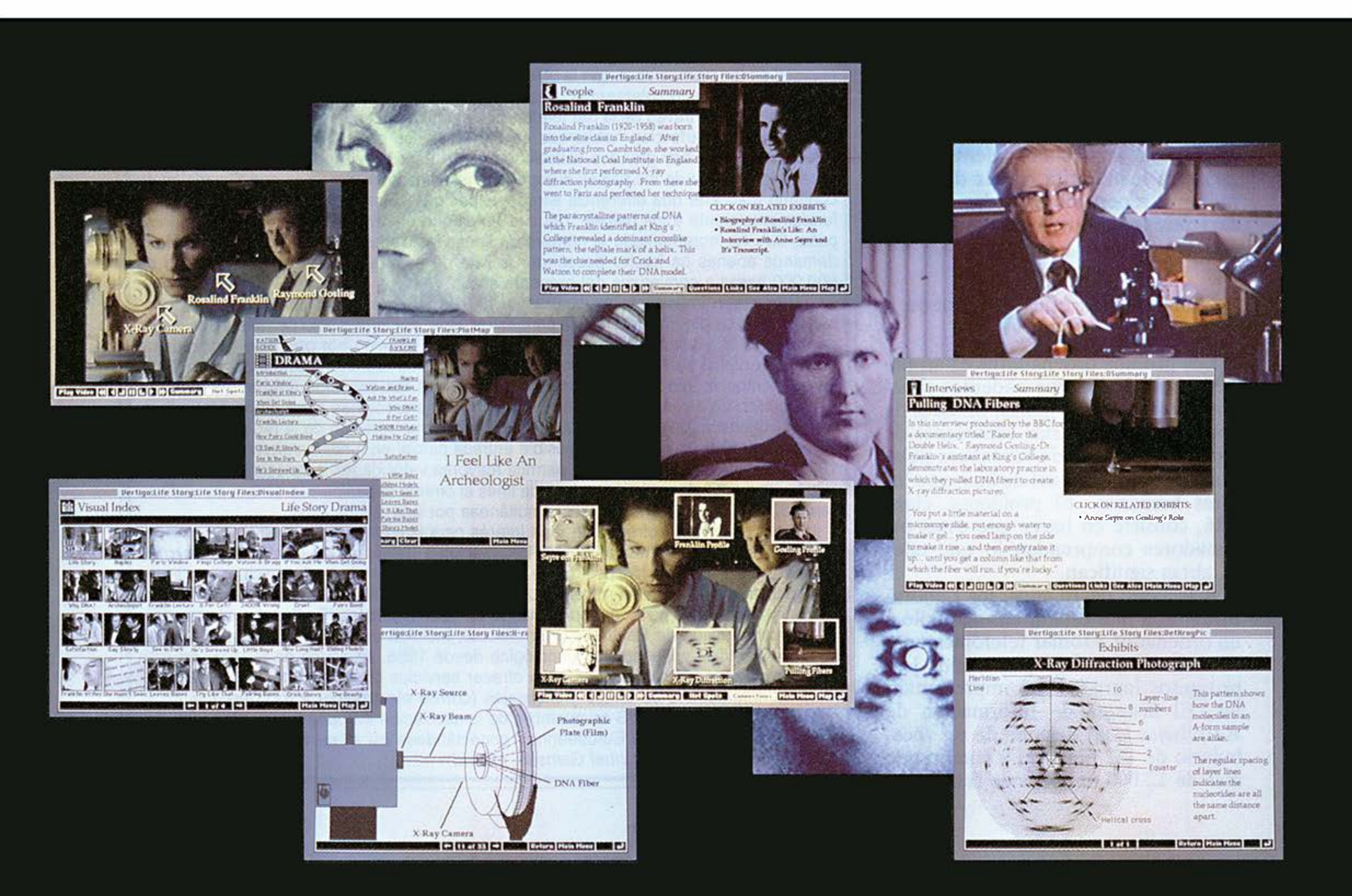
Cuando AIS no sabe una cosa, no sabe que no la sabe. En tanto que proyecto de investigación, AIS supone un logro muy elogiable, aunque Roe señala que en el mundo real no llegaría muy lejos ofreciendo vuelos vegetarianos a Seattle. Tendría que haber sabido contestar que no ha entendido lo que le han dicho.

Un poco más allá, en el mismo edificio, se encuentra una sala de conferencias llamada HuMaNet (de "Human Machine Network"), que es lo bastante lista como para ignorar nuestra presencia si no le hablamos. Lo que no carece de importancia, porque el sistema controla la iluminación y los materiales audiovisuales, amén de las líneas telefónicas conectadas a la sala. Sus diversos componentes responden a los nombres de "control de recursos", "control de la base de datos" y "control de la red digital de servicios integrados", o "control RDSI", por brevedad. (Integrated Services Digital Network, ISDN, en inglés.)

El "entrenador" de HuMaNet se llama David Berkley. "Control de recursos, bajar luz", dice Berkley, y las luces se atenúan. Los micrófonos de la sala, del tipo "buscavoz", se encuentran situados donde menos molestan, sobre las pantallas de proyección. Las butacas y sofás son cómodos. "Control de base de datos, videograma uno", pronuncia Berkley, y en una de las pantallas de vídeo aparece la imagen de una rana arbórea. "Control de base de datos, siguiente imagen"; otra rana. "Control RSDI, llamar sala número dos", y HuMaNet marca el número. La sala se desconecta de nosotros mientras Berkley procede a explicarnos su funcionamiento.

HuMaNet dispone de un vocabulario de 80 palabras entre las que figura la voz "por favor", porque –dice Berkley– a muchas personas les cuesta echar por la borda las formas de cortesía. Los componentes del sistema están gobernados por ordenadores tipo PC, e integrados a un puesto de trabajo Sun. Todo el sistema cabalga sobre una línea de transmisión RDSI, que opera a 144.000 bits por segundo. Incidentalmente, esa es la tasa actual de funcionamiento para el servicio RDSI, ya instalado en más de 100 compañías estadounidenses.

También subyace el paradigma de la persona en su totalidad a la fasci-



nación que la industria siente por los llamados "multimedios", una combinación de texto, gráficos y señales de audio y vídeo orquestada mediante ordenadores. Grandes compañías, como IBM, Apple, Intel, AT&T y Bellcore, lo mismo que empresarios como Robert Abel, especialista en efectos especiales, o instituciones menores, como el Instituto de Investigación del Aprendizaje, en Palo Alto, están experimentando interfases que abren la posibilidad de diversos grados de interacción con el usuario. Una firma de asesoramiento de Alexandria, Virginia, llamada Information Workstation Group, estima que, hacia 1994, los multimedios supondrán una cifra de mercado de 16.600 millones de dólares (casi 2 billones de pesetas).

## Aventuras en los multimedios

Los programas multimedios suelen denominarse de "infotenimiento", o sea, de instrucción en forma de vídeojuego. Uno de los prototipos más refinados es el titulado "Historia de la vida", confeccionado por la Institución Smithsoniana, Lucasfilm Ltd., Adrian Malon Productions y las cinco o seis personas que integran el Laboratorio de Multimedios de Apple en San Francisco. En realidad, la "Historia de la vida" es el nombre de un programa de televisión sobre el descubrimiento de la estructura del ADN, preparado en 1986 por la BBC. Este prototipo de multimedios se vale de una dramatización como trampolín para investigar las personas que participaron en el descubrimiento y las actividades que realizaron.

Uno de los principales arquitectos del programa, un pacífico "infanático" llamado Fabrice Florin, me mostró cómo se "congela" una escena y se la descompone. Pronto llegué a un fragmento sonoro en el que Anne Sayer, biógrafa de Rosalind Franklin, explica la educación que tuvo ésta; después me fue presentado un "corto" de vídeo donde el propio James Watson comenta cómo había sido retratada Franklin en la escena que yo acababa de presenciar; después fui suavemente llevada a una vívida explicación del procedimiento que utilizaron los científicos para definir la estructura del ADN; acabé por fin aterrizando en una entrevista con Linus Pauling, quien reconocía a regañadientes que el descubrimiento de Watson y Crick podía ser el más importante de la biología del siglo xx (ambos, al alirón, le arrebataron a Pauling el que podría haber sido su tercer premio Nobel).

Lo pasé muy bien, aprendí muchísimo, y me olvidé de hacerle a Florin preguntas incisivas. Entonces, alguna cosa de una de las "fichas" me recordó algo que había leído ya unas cuantas fichas atrás. Quise volver a consultarlas, pero no tenía la menor idea de dónde se encontraba esa ficha con relación a mí posición actual. Me sentí presa del pánico. Me había perdido.

"Quiero retroceder", le dije a Florin.

"¿Retroceder... adónde?", quiso saber él. ¿Cómo explicárselo? Olvidemos la ficha.

"¡Hasta el principio!", pronuncié en un medio gañido. Pero... ¡un momento! Lo que tenemos entre manos son hipermedios. No hay principio. El lugar por donde comenzamos no es necesariamente el punto donde hay que comenzar. Me encuentro a la deriva en un mar de información, sin ningún punto de referencia. ¡Socorro!

Tal vez sea yo prisionera de la linealidad de mis prejuicios, inducidos por una cultura occidental demasiado asentada en el hemisferio cerebral izquierdo, pero la verdad es que para orientarme necesito algo así como un rastro de cortezas de pan. Más tarde, Tom Landauer, maestresala del "Superlibro" de Bellcore, me refirió que son muchos quienes se pierden en semejantes programas. El Superlibro es un medio de los llamados "hipertexto", lo que significa que la información se encuentra estratificada a diversos niveles de detalle. Superlibro presenta en la pantalla un árbol que indica en qué estrato se encuentra el usuario, un "aquí está usted" para el viajero de hipertexto. Me sentí reconfortada.

También se han incorporado los multimedios al "trabajo cooperativo con respaldo informático", cuyo propósito es permitir que interactúen entre sí personas ubicadas en lugares alejados, y que éstas puedan manejar unos mismos documentos y archivos en un espacio virtual que podría abarcar desde unos pocos metros a continentes. Algunos de los proyectos, como el Rapport, de los Laboratorios Bell, y el prototipo Slate, realizado por BBN Systems and Technologies Corporation, se fundan en sistemas de terminales. Otros, como la Video Window de Bellcore y el Colab de PARC, se valen también de proyecciones en pantalla. El remoquete genérico de los programas de "trabajo cooperativo con respaldo informático" es "soporte lógico grupal" o, en inglés, "groupware".

## Seamos virtuales

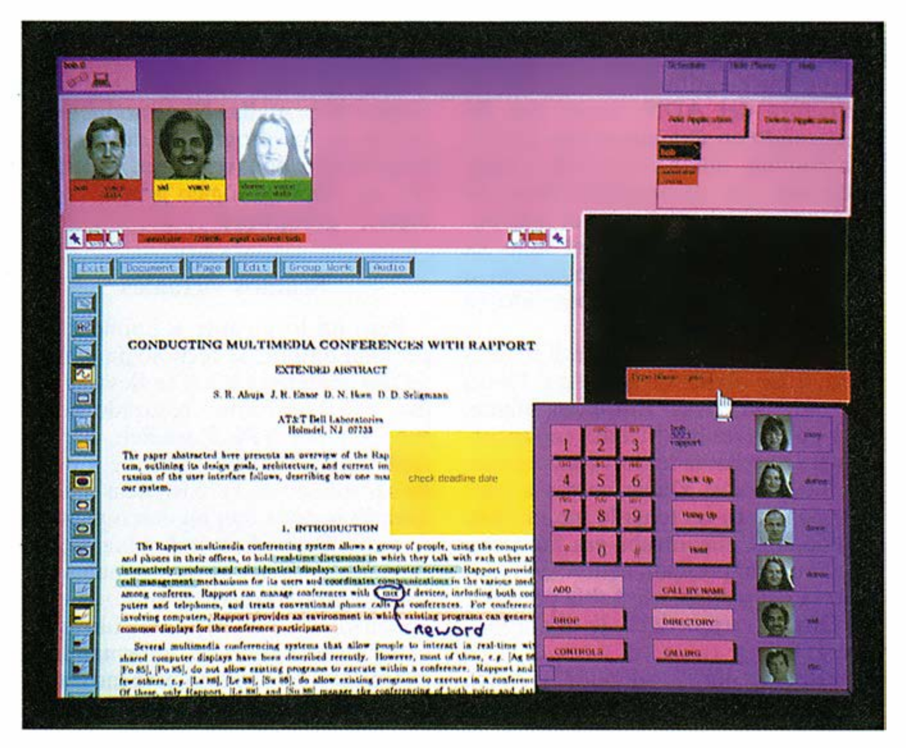
Pero en lo tocante a implicar a la persona entera, la tecnología conocida por realidad virtual se lleva la palma. Fue éste campo roturado por la NASA y por VPL Research, Inc. La realidad virtual nos envuelve a modo de sucedáneo de la existencia real. El usuario se toca con un casco provisto de pantallas gráficas individuales para cada ojo, y de un guante o incluso un traje completo provisto de toda clase de sensores y entretejido de fibras ópticas. Este equipo va informando al ordenador de cómo se está moviendo el usuario. Uno puede caminar por un "espacio virtual", "volar" con la punta de un dedo y asir o recolocar objetos en ese espacio. Dos personas pueden penetrar en una misma realidad o interactuar entre sí revestidos de sus atuendos virtuales.

Lo mismo que las máquinas parlantes de AT&T y que las presentaciones audiovisuales por multimedios de Apple, la realidad virtual busca legitimidad en las aplicaciones prácticas. Algún día podría contribuir a la "visualización asociada a la supervisión de sistemas complejos", a la "arquitectura, urbanismo y previsión de productos y diseños" o a la "simulación tridimensional del montaje de piezas", afirman los materiales de difusión y publicidad de VPL. Hoy por hoy, es mera diversión.

"Vaya con cuidado. Más de un autor de ciencia ficción ha quedado atrapado aquí", dice Jaron Lanier, fundador e ingeniero jefe de VPL Research, mientras me ciñe a la cabeza el casco del mundo virtual. En este caso, "aquí" significa una reconstrucción virtual del té que le ofrece a Alicia el Sombrerero Loco en *Alicia en el país de las maravillas*. Alicia soy yo.

"¿Le importa a usted ser Alicia?", pregunta Lanier. "Porque puede ser el Sombrerero Loco si lo desea. A veces los hombres se enfadan cuando descubren que son Alicia", añade. Puedo oír lo que Lanier me dice, pero todo cuanto alcanzo a ver es un panorama multicolor de formas geomórficas, una cadena de montañas en el horizonte, una mesa de picnic con servicio de té, al Sombrerero Loco cerniéndose a prudencial distancia y, algo más cerca, una mano, que bruscamente reconozco que es la mía.

**1. PROTOTIPO DE LOS MULTIMEDIOS, "Historia de la vida" le permite al usuario explorar a voluntad diversos aspectos del descubrimiento de la estructura del ADN. El prototipo, que toma su nombre de una dramatización preparada en 1986 por la BBC, incorpora fragmentos sonoros, cortos de vídeo, diagramas generados por ordenador y escenas animadas, así como secuencias del programa de televisión en que se inspiró. "Historia de la vida" es fruto de una colaboración entre el Laboratorio de Multimedios de Apple, la Institución Smithsoniana, Lucasfilm Ltd. y Adrian Malone Productions.**




**2. CIERTOS PROYECTOS DE TRABAJO en equipo, como el Rapport de Laboratorios Bell, permiten que personas de localidades distantes puedan trabajar conjuntamente sobre unos mismos documentos o archivos informáticos. Las fotografías de lo alto de la pantalla indican enlaces de audio o de vídeo (Doree, "ausente", ha abandonado temporalmente su terminal). Los usuarios pueden realizar y corregir textos con ayuda de un estilo electrónico (*colores del centro*) y añadir notas al cuerpo de un documento (*recuadro amarillo*). En el tercio inferior vemos un teclado telefónico.**



**3. UNA VENTANA DE TELECONFERENCIA pone en comunicación a grupos de personas mediante vídeo de pleno movimiento y micrófonos que no es preciso operar manualmente. Los reunidos pueden proyectar transparencias sobre una mitad de la ventana, para su examen conjunto.**

"Si extiende usted el dedo índice podrá volar", dice Michael A. Teitel, ingeniero jefe de óptica de VPL. Pero antes quiero echar una ojeada. Vuelvo lentamente la cabeza a derecha e izquierda; lentamente, porque en este día concreto, el sistema de Lanier está funcionando a la cuarta parte de su capacidad y, si vuelvo rápidamente la cabeza, la interfase gráfica que me está suministrando un mundo no podrá seguirme. Entonces me marearé y me caeré, lo que también resulta que forma parte de la diversión.

Apunto con el dedo y salgo disparada hacia el pie de la cordillera; me vuelvo lentamente para ver de dónde vine. Ha sido mucho el camino y me siento solitaria. Ya es hora de regresar a tomar el té.

"También puede asir cosas", dice Teitel, que está supervisando mi realidad en un monitor gráfico de tipo ordinario. Intento varias veces sin éxito tomar una taza de té, mientras Lanier y él me animan a gritos. Cuando por fin le cojo el tranquillo a mi nueva mano, me siento poseída por el deseo de arrojar cosas. Seguramente sea así como se siente un bebé.

La diversión tiene su precio. VPL vende una versión monousuario de su sistema RB2 ("reality built for two", "realidad construida para dos") por 225.000 dólares (unos 27 millones de pesetas), en los que incluyen los dos ordenadores IRIS de Silicon Graphics que controlan las imágenes de cada ojo. Si uno no quiere andarse por las ramas y desea el sistema RB2 completo para dos personas, VPL está dispuesta a descontar 20.000 dólares del segundo equipo y vender el total por 430.000.

Más tarde, en esa misma sesión, Teitel y yo construimos una realidad a nuestra medida, en la que introdujimos mosquitos con forma de bombarderos Stealth. Estaba previsto que los mosquitos zumbaran en torno a mi cabeza, sin apartarse nunca más de unos cuantos palmos, de acuerdo con la tradición largamente contrastada por el tiempo. Pero cuando me introduzco en la nueva realidad, no alcanzo a ver ningún mosquito. Teitel me asegura que allí están los cuatro, pero que por alguna razón me acechan desde atrás, justo más allá de mi visión periférica. Efectúo en vano algunas tentativas de darme la vuelta rápidamente y coger desprevenidos a los insectos. Me mareo y me caigo.

Teitel sucumbe ante el inevitable retruécano. "Tiene que haber algún bicho en el programa"

Los proyectos como HuMaNet, Historia de la vida o Superlibro constituyen gallardas tentativas de las compañías, grandes y pequeñas, por

disolver la resistencia que hoy le impide al ordenador disfrutar de la ubicua presencia de que gozan la radio y la televisión. Casi todos los prototipos mencionados exigen capacidades extraordinarias de almacenamiento y manipulación de datos. Muchos de ellos presuponen también la existencia de "datoductos" digitales capaces de transferirlos.

## La línea de la fiesta

La transmisión digital de vídeo con pleno movimiento y de calidad equivalente a la imagen de televisión exige la transmisión de unos 45 millones de bits por segundo. Incluso una imagen estática de televisión engulle 24 millones de bits de memoria en un archivo informático. Las líneas telefónicas transportan señales audibles a razón de unos 64.000 bits por segundo, y la transmisión de datos es todavía más lenta: un modem típico (modem es la abreviatura de modulador-demodulador) envía datos por las líneas telefónicas a razón de 2400 bits por segundo. Harían falta casi tres horas para la transmisión de un sólo cuadro de TV (sin sonido) por medio de un modem.

Se ha informado que los cables de fibras ópticas han llegado a transmitir un billón ($10^{12}$) de bits por segundo. Las velocidades de transmisión conseguidas por las fibras ópticas se han multiplicado por 100 a lo largo del decenio pasado, al tiempo que su costo bajaba desde 3 dólares (unas 370 pts.) el metro a unos 15 céntimos de dólar (unas 18 pesetas), según Kessler Marketing Intelligence. En los Estados Unidos, AT&T y otras compañías de comunicaciones, amén de los servicios postales y telegráficos estatales de otros países, están tendiendo millones de kilómetros de fibras ópticas todos los años. "La capacidad la tenemos ya", afirma Bob Lucky. "La única cuestión estriba en si vamos a poder ponernos de acuerdo en la forma de utilizarla".

Cuestión que ha suscitado no pocas maniobras políticas y económicas. "No se me ocurre nada que exija mayor capacidad de visión arquitectónica que la interconexión de normas nacionales ya en funcionamiento, para formar redes internacionales", dice Irwin Dorros, vicepresidente ejecutivo para servicios técnicos en Bellcore. Dorros afirma que la comunidad de proveedores, usuarios y organismos reguladores han de llegar a alguna clase de consenso acerca de los puntos a los que ha de ir la fibra, quién va a pagar su instalación, quién será el propietario de la red resultante y qué servicios va a prestar. Todas estas cuestiones, a su vez, pesan en las normas técnicas de la red: velocidades de transmisión, mecanismos de conmutación, protocolos informáticos y demás. "Mientras no se resuelvan estos problemas, la aldea planetaria de que hablan no es más que un espejismo", dice Solomon Buchsbaum, vicepresidente de relaciones con los consumidores en AT&T.



**4. ATASCO DE TRAFICO TELEFONICO consiguiente al terremoto de San Francisco. Nos ilustra las crisis que pueden perturbar a los sistemas de gestión de redes de comunicaciones. Las líneas indican las llamadas telefónicas que no habían sido atendidas 90 minutos después del terremoto del 17 de octubre de 1989. El grosor y color de las líneas manifiestan la extensión del bloqueo; el color azul representa el número más bajo de llamadas no concluidas; el rojo, el más alto. Se producen atascos similares en concursos telefónicos o en demanda de entradas para conciertos de masas.**

Y aquí es donde se rompe la feliz camaradería entre las industrias informática y de comunicaciones. Las compañías telefónicas no están habituadas al transporte de datos y las compañías de informática no están hechas a la idea de prestación universal de servicios. "Existe un auténtico problema cultural entre nosotros y la compañía telefónica", declara Davis Clark, del laboratorio de informática del M.I.T.

Clark presidió el crecimiento de esa especie de leviatán informático que es la red Internet. Como él dice, Internet creció "sin orden ni concierto" a partir de una red de cuatro nodos instituida en 1969 por el Departamento de Defensa de los EE.UU. Hoy se ha convertido en una especie de intangible octava maravilla del mundo, que conecta entre sí 936 redes, un mínimo de 175.000 ordenadores y un número incontable de usuarios de 35 países. La gente habla de Internet como si de un ser vivo se tratase. Clark describe su crecimiento como "democracia anárquica en su mejor expresión".

La comisión consultora de la International Telegraph and Telephone, más conocida por ITT, ha forjado ya las normas correspondientes al canal unificado de voz y datos, llamado RDSI.

Inicialmente, las líneas RDSI proporcionarían dos canales de voz de 64.000 bits por segundo y un canal de datos de 16.000 bits por segundo; estas velocidades constituyen el límite superior para el cable de cobre estándar. Pero, en el competitivo ambiente del mercado estadounidense, los estándares no son precisamente un incentivo económico para la construcción de "superautopistas" de transmisión de datos para uso público, que pondrían la transmisión de datos de alta velocidad al alcance de cada individuo.

"El negocio no está en las redes a escala global, sino en las redes privadas", explica Lucky. "Todas las grandes corporaciones tienen sus propias redes, porque ahí es donde fluye el tráfico más denso. Alrededor del 95 por ciento de las llamadas se efectúan dentro de esas pequeñas islas." Por otra parte, para establecer una red universal habría que "preparar una red para millones y millones de personas, que solamente canalizaría el 5 por ciento de las llamadas."

Kapor, de ON Technology, culpa a los creadores de aplicaciones por no haber sabido engendrar el impulso conceptual que hubiera arrastrado inversiones de capital y promovido el consenso político en favor de un servicio más universal. "No se puede esperar que Washington se apasione por las cosas en abstracto", afirma. "Nadie piensa en lo tocante a contenidos"



## Japón dice *hai* a las fibras ópticas

Si los proyectos que la NTT (Nippon Telegraph and Telephone) dio a conocer el pasado mes de octubre llegan a materializarse, los japoneses se encontrarán allá por el 2015 entretejidos en un sistema de comunicaciones por fibras ópticas que llegará prácticamente a todos los hogares y oficinas. La «red digital de servicios integrados» RDSI (ISDN, en siglas americanas) proporcionará la capacidad necesaria para prestar servicios como el TV-fono y los noticiarios electrónicos «a la carta» a los 50 millones de usuarios de la compañía, amén de enlazar el archipiélago mediante cables submarinos y satélites de comunicaciones a redes similares de Occidente. NTT afirma que el servicio tenía 7 000 suscriptores en más de 200 ciudades al cumplirse en abril de este año su segundo aniversario.

La red NTT, lo mismo que la RDSI disponible en otros países, opera típicamente a 64.000 bits por segundo y tiene una capacidad máxima de transmisión de 1,5 megabits por segundo. Su capacidad de transmisión en banda estrecha supera en más de 50 veces la velocidad normal de transmisión de datos por línea telefónica, que es de unos 1 200 bits por segundo a través de modem. No obstante, todavía no puede portar imágenes de vídeo con movimiento completo, ni televisión de alta definición ni el tráfico informático entre redes locales. Consiguientemente, la NTT se está preparando para servicios RDSI de banda ancha con capacidad de hasta 150 millones de bits por segundo. Iwao Toda, un veterano ejecutivo de NTT que dirige la sede central de los departamentos de investigación y desarrollo de la compañía, informó a *Investigación y Ciencia* de que los laboratorios de NTT están investigando otro salto que lleve a los 10.000 millones de bits por segundo.

Recientes propuestas gubernamentales de fragmentar la NTT han dejado helados a algunos entusiastas de la red digital de servicios integrados; pero, desde el punto de vista de la NTT, las únicas cuestiones serias serán cuándo y cómo efectuará la compañía las enormes inversiones (que se estiman entre 25 y 30 billones de yenes, o sea, de 18 y 23 billones de pesetas) precisas para equipar al archipiélago con una red contigua. «No hay duda de que pueden hacerlo», opina Nobuyuki Nakahara, presidente de Tonen, una compañía petrolífera que ha diversificado su actividad con la manufactura de hikari fiba («fibra óptica»). En efecto, con 280.000 empleados y un capital mayor que el de cualquier otra compañía del mundo (11,559 billones de yenes en activos, o sea, unos 8,45 billones de pesetas), la NTT debería poder estar a la altura de la ocasión.

No todos están en Japón desbordantes de entusiasmo por el futuro electrónico. Hace cien años, los samuraris, teniendo por amenaza las nuevas líneas telefónicas del país, pasaban bajo ellas sosteniendo sobre sus cabezas abanicos blancos para desviar de sí la impureza. En el día de hoy, los extremistas sabotean de cuando en cuando los cables de la NTT. Pero la NTT ya ha tendido la vista al frente, hacia el tiempo en que los propietarios de las cadenas nacionales de comunicaciones lleguen a cooperar a escala global. Al resumir sus pensamientos, Toda toma un verso de uno de sus musicales favoritos, *El hombre de la Mancha:* «Sacrificar los propios sueños es locura». *—Henry Scott Stokes, Tokio.*

Pero no falta quien esté pensando en los contenidos de la revolución informática y de comunicaciones. No son muchos los puntos de acuerdo, pero uno es seguro: que la nota más destacada de la era de la información va a ser la necesidad de eliminar información. El habitante medio de la gran aldea planetaria se encontrará recibiendo un auténtico torrente de tráfico de los medios de comunicación. Y ya el propio MacLuhan advirtió que "cuanta más información es preciso evaluar, menos se sabe."

### Robots sapientes

"El problema principal es que nuestro cerebro sólo es capaz de absorber unos 50 bits por segundo. La tecnología no puede cambiar ese dato", dice Buchsbaum, de AT&T. La cifra alude a la cantidad de información que una persona puede registrar, muy modesta frente a la cantidad que los órganos de los sentidos cosechan. "No vamos a rediseñar el cerebro humano", añade Buchsbaum. "Somos bestias analógicas". ¿Cuál es, pues, la solución? Una posibilidad es "salir de onda", desconectar. Alvy Ray Smith, de Pixar, una empresa de gráficos de San Rafael, California, predice el florecimiento de una contracultura que pura y simplemente se desengancharía de la gran corriente social. La mayor parte de nosotros, sin embargo, estamos enganchados ya.

Podríamos pagar a otras personas para que contuvieran para nosotros la marea de información. Como señala Nick Negroponte, del Laboratorio de Medios, eso es precisamente lo que asesores, secretarios y periodistas están haciendo ya. De hecho, sostiene Negroponte, no existe razón alguna para que tal filtrado de información haya de ser realizado por un ser humano, de estrecho y magro ancho de banda. Los expertos en inteligencia artificial de PARC (Xerox), IBM, AT&T, M.I.T. y otros laboratorios industriales o académicos están diseñando programas que averiguan las cosas que a uno le gustaría saber y eliminan aquellas otras en las que no se está interesado. ¿Y cómo sabe un programa de ordenador lo que a uno le gusta? Aprende nuestras preferencias fijándose en lo que hacemos, "exactamente igual que un secretario", me dijo un investigador.

Tales programas han recibido la denominación de agentes computacionales, y también "discernobots". Thomas Malone, de la Sloan School del M.I.T., dispone de un embrión de programa discerno-robótico, que establece las prioridades de su correo electrónico atendiendo a parámetros tales como si proviene o no de su superior. En última instancia, los discernobots podrían proporcionar a los sistemas informáticos defensas contra los "virus" y asumir la protección de las informaciones delicadas o confidenciales, manteniendo a raya a los intrusos. Podrían asimismo actuar como emisarios personales, a modo de celadores o defensores a ultranza de la propia intimidad.

"Máquinas servidoras nuestras, que hablan con otras máquinas": tal es la descripción que les da Negroponte. Este afirma hallarse dispuesto a pagar 100 dólares al año por disponer de la información contenida en cada número de *Investigación y Ciencia* que le fuera necesaria, condensada en un resumen de menos de una página. "Los ordenadores podrían encargarse de esa tarea. En el futuro habrá máquinas en ambos extremos de la línea de comunicación. No estoy diciendo que nosotros vayamos a quedar anticuados, sino que ellas hablarán en nuestro nombre. Pero esto no nos pasará ni a usted ni a mí."

Kapor no está dispuesto a llegar tan lejos. "No creo que se pueda alcanzar una automatización total, ni me parece tampoco que sea deseable. Las personas siempre actuarán mejor que los métodos estrictamente mecánicos." Por el momento tendremos que hacerlo. Los robots con discernimiento son todavía entelequias de fantasía... o de pesadilla, según el punto de vista que el lector prefiera.

Tal como están las cosas, la convergencia de informática y tecnología de las comunicaciones se caracteriza por ser un vergel en cuanto a posibilidades y un páramo en cuanto a orientación. "La distribución y entrega de información cambiará el funcionamiento de la gente, de los negocios y de los países", dice Buchsbaum. La cuestión es saber en qué sentido. "Como es obvio, el poder y la riqueza serán redistribuidos", dice Peter Schwartz, de Global Business Network, firma de asesores especializada en situaciones futuras. "Pero no necesariamente de formas predictibles."

### Nueva visita a la aldea

Gran parte de la incertidumbre que se vive en el mercado de la información es consecuencia de que nadie ha calculado el valor económico de la información y su difusión e entremezclado. "Resulta difícil saber cómo marcar precio a la información en un sentido acorde con la realidad", hace notar el sociólogo Daniel Bell. "La información no es consumida y destruida en la forma en que son consumidos y destruidos los alimentos."

Bob Lucky llama a la información "éter económico". El ejemplo más obvio es la piratería de programas. Se pueden regalar programas una y otra vez, y seguir uno teniéndolos. Esta cualidad de la información, que recuerda el milagro de los panes y los peces, no tiene cabida entre las parábolas del capitalismo.

"Todo nuestro sistema económico tiene por axioma la noción de propiedad", dice Marc Porat. Mientras que la propiedad es escasa por naturaleza, la información no es inherentemente escasa; por lo tanto, "la economía neo-clásica no es de aplicación a ella". Según Henry Kelly y Andrew W. Wyckoff, de la Oficina de evaluación de tecnología, dependiente del Congreso estadounidense, el contenido de información de una porción de pizza (publicidad, cargas fiscales, etc.) supone un mayor porcentaje del costo que el contenido comestible.

Y mientras economistas y gestores se esfuerzan por redefinir el concepto de valor, la economía de la información está borrando otro de los hitos clásicos: las fronteras nacionales. "El imperativo absoluto de la era de la información estriba en la necesidad de establecer una economía a escala planetaria", afirma Penzias, de los Laboratorios Bell. "Si en una fiesta te preguntan '¿Cuál es su estrategia de globalización?' y respondes, '¿Qué es eso?', te tornas invisible."

Esta actividad económica a escala global no es sinónima de homogeneidad para el consumidor; en realidad, presagia exactamente lo contrario. "Basta hablar con la gente de publicidad", dice Dan Bell. "La palabra clave es 'nichos'". La Comisión Think-Net, con sede en París, afirma que la creación de redes a gran escala permitirá la "confección a la medida en masa", al hacer posible la calibración individual de las preferencias de los clientes. Desde Seattle a Singapur, pasando por Barcelona, los consumidores podrían tener coches, ropas y cortinas fabricados según sus especificaciones, porque los proveedores podrían conocer con toda seguridad la demanda.

Lo que en un aspecto es elemento liberador podría muy bien resultar restrictivo en otro. En su libro *Technologies of Freedom*, publicado en 1983, Ithiel de Sola Pool, del M.I.T., prevenía que la gradual digitización de todas las formas de expresión podría abrir un vía para socavar los derechos recogidos en la Primera Enmienda a la Constitución estadounidense. Pool señalaba que las cadenas de televisión y radiodifusión han aceptado ya la dilución de tales derechos; si el gobierno opta por considerar que toda la información digitizada pertenece a una misma categoría, podría tratar de ejercer control sobre todos los materiales accesibles a través de las avenidas electrónicas.

En cualquier caso, las empresas editoriales, las compañías cinematográficas y las cadenas de radiodifusión tendrán que hallar nuevas formas de habérselas con un ambiente radicalmente distinto del hoy existente. Los propios consumidores estarán irrumpiendo en el territorio de estas industrias. Dotados de redes de alta velocidad e interfases multimedios, los autores podrían diseminar su obra sin necesidad de editores, los compositores y músicos dispondrían de público sin necesidad de firmar contratos de grabación y quienquiera que dispusiera de una cámara de vídeo podría producir y distribuir su propia tertulia.

Es demasiado pronto para decir cuáles de estas especulaciones recibirán el espaldarazo del futuro, si es que alguna lo recibe. En un artículo publicado en *Daedalus* en 1987, Bell asimilaba la "sociedad mundial" forjada por la tecnología de la información a "un juego de gigantescos móviles de Calder, oscilando en desazonado equilibrio... Las configuraciones exactas son difíciles de captar."

En otras palabras, siga en la onda.

# Terremotos en la corteza continental estable

*Los terremotos pueden producirse incluso en una corteza estable, lejos de las conocidas zonas sísmicas, situadas en los bordes de las placas tectónicas. ¿Cómo explicar tales episodios?*

Arch C. Johnston y Lisa R. Kanter

Charleston, ciudad de Carolina del Sur, se encuentra muy alejada de cualquier zona sísmica. La mayoría de los terremotos mundiales, los espectaculares y los irrelevantes, se producen en el cinturón del Pacífico, en el Mediterráneo y en Asia Central. Sin embargo, en 1886, un temblor varias veces mayor que el que sacudió San Francisco en octubre del año pasado causó daños importantes en una gran parte de Charleston. Cerca de la costa, la tierra saturada de agua se licuó, formándose géiseres de arena y lodo. Hubo gran número de muertos y la recuperación de la ciudad de los efectos de la guerra civil, ocurrida veinte años antes, se vio dificultada.

De acuerdo con casi todos los modelos en vigor, Charleston se halla en una zona de geología tranquila. La formación de nuevas montañas, el vulcanismo, las fallas activas y la mayoría de los terremotos tienen por escenario los límites entre placas, donde las placas de roca de 100 kilómetros de espesor que forman la parte exterior de la Tierra colisionan, se separan o deslizan una sobre otra. La falla de San Andrés, por ejemplo, límite entre la placa que comprende la mayor parte de América del Norte y la placa del océano Pacífico, atraviesa California. Sin embargo, Charleston se encuentra muy lejos de un límite de placas; el borde oriental de la placa de Norteamérica yace a miles de kilómetros de la costa, en medio del océano Atlántico. Es una zona que no ha sufrido la actividad tectónica (deformadora de la corteza) del borde de una placa desde la apertura del Atlántico, hace unos 180 millones de años.

ARCH C. JOHNSTON y LISA R. KANTER son, respectivamente, director del Centro de Investigación e Información de Terremotos (CERI) de la Universidad estatal de Memphis y profesor de investigación. Johnston, que enseña también geofísica en la mencionada universidad, entró en el CERI en 1979, tras doctorarse por la de Colorado en Boulder. Ha asesorado en riesgo sísmico a distintas organizaciones públicas y privadas, incluido el Congreso de los Estados Unidos. Kanter se doctoró en la Universidad de Stanford en 1983; dos años después ingresaba en el CERI. El trabajo recogido en este artículo, nos cuenta Johnston, arrancó cuando nadie, en una reunión abarrotada de eminentes sismólogos, pudo decir cuál era el mayor terremoto registrado en corteza continental estable.

El terremoto que derribó edificios en Newcastle, en el este de Australia, en diciembre del año pasado, se produjo en una corteza de historia similar. Como se demuestra por estos terremotos y otros episodios de mayor potencia —en el valle del Mississippi en 1811 y 1812, y en la provincia de Kutch, India, en 1819—, son posibles y, en efecto, ocurren grandes seísmos en el interior de las placas. La escasez de estos terremotos y el hecho de que los principales ocurrieran antes del desarrollo de instrumentos precisos han convertido su estudio en una rama estancada de la sismología. Ahora bien, su misma existencia constituye no sólo un fascinante rompecabezas geofísico, sino también una fuente de preocupación al planificar instalaciones problemáticas, centrales nucleares por ejemplo. La verdad es que fueron los problemas del riesgo sísmico los que nos impulsaron a realizar un estudio sistemático de estos terremotos, subvencionado por el Instituto de Investigación de la Energía Eléctrica de Palo Alto, California. Intervinieron también Kevin J. Coppersmith y sus colaboradores, de Geomatrix Consultants en San Francisco, y Ann G. Metzger, de la Universidad estatal de Memphis.

Teníamos que dar respuesta a dos cuestiones fundamentales: cuánta actividad sísmica se producía en el interior de las zonas estables de los continentes y si había rasgos geológicos específicos que convirtieran determinadas áreas de la corteza estable en particularmente proclives a los terremotos. Empezamos por acotar el estudio a América del Norte. Pero vimos pronto que el escaso registro de tales raros episodios en un continente no proporcionaría los datos suficientes para un análisis fiable. Decidimos entonces sustituir el tiempo por el espacio, y abordar la frecuencia y la distribución de seísmos en las áreas continentales estables de todo el mundo.

¿A qué llamar corteza continental estable? Debíamos identificar las partes más tranquilas de los continentes, suficientemente alejadas de la actividad tectónica que se desarrolla en los límites de las placas. Eran, sin duda, corteza estable los escudos rocosos que forman los núcleos antiguos de los continentes, algunos de los cuales tienen más de tres mil millones de años de antigüedad; lo eran también las "plataformas" cubiertas de sedimentos que rodean los escudos. En el extremo opuesto, quedaban excluidos los límites de las placas. Fuera de eso, sin embargo, no resultaba fácil considerar una zona como corteza estable.

La actividad tectónica promovida por las interacciones entre las placas se extiende mucho más allá de los bordes de las mismas. Allí donde las

placas convergen y una placa oceánica subduce bajo una placa continental, pueden producirse actividad volcánica y formación de montañas en una franja de cientos de kilómetros de ancho sobre la placa continental superior, tal y como ocurre en los Andes. Si las dos placas están formadas por continentes o por fragmentos continentales, la colisión puede producir una región de terreno plegado, levantado y fallado, de varios miles de kilómetros de extensión; son ejemplos de ello el Himalaya, la Meseta Tibetana y el Asia Central hasta el lago Baikal por el norte.

El proceso inverso —la apertura de un continente para constituir dos nuevas placas separadas por un centro de expansión donde se genera nuevo suelo oceánico, así la dorsal Medioatlántica— origina también una zona extensa de corteza deformada. Con el desarrollo de la fracturación, la corteza continental se estira y adelgaza, apareciendo fallas y vetas de material volcánico. Una vez formado por completo un centro de expansión oceánico entre los bordes fracturados del continente, la corteza continental deja de estirarse. Sus bordes se enfrían y se hunden, creando márgenes pasivos.

Conforme los bordes de las placas se van desplazando y reorientando a lo largo del tiempo geológico, las regiones deformadas por compresión o por estiramiento pasan a constituir parte de los interiores estables de las placas. Ya no son escenario de intensa actividad tectónica, a pesar de que todavía sufren tensiones —por lo general, de carácter compresivo— que se transmiten desde los bordes distantes de las placas. Por tanto, junto con los antiguos escudos y plataformas, consideramos corteza continental estable las cadenas de montañas de edad superior a 100 millones de años (por ejemplo, los Apalaches y los Urales, pero no los Alpes y el Himalaya) y los márgenes pasivos de edad superior a 25 millones de años (los márgenes del Atlántico, pero no los del mar Rojo). También incluimos antiguos rifts abortados, donde no se ha desarrollado completamente un centro de expansión y se ha hundido la corteza estirada, formando un valle



**1. FALLA EN CORTEZA ANTIGUA, escenario, en 1988, de una serie de terremotos de magnitud-momento 6 cerca de Tennant Creek, en el Territorio del Norte de Australia. Estos episodios se encuentran entre los escasos terremotos registrados en continente estable que han roto la superficie. La fotografía fue tomada por J. Roger Bowman, de la Universidad de Australia.**

ancho o una fosa cubierta de sedimentos. De acuerdo con estos criterios, casi dos terceras partes del total de la corteza continental se consideran estables.

Para determinar la actividad sísmica en estas partes menos predispuestas de los continentes, no podíamos apoyarnos sólo en registros instrumentales recientes; incluso el número total de registros resulta demasiado escaso. Tuvimos que ampliar nuestro estudio; y aceptamos los terremotos descritos en relatos históricos. En Norteamérica esos testimonios empiezan en los siglos XVI y XVII, mientras que en Europa abarcan 1000 años y, en China, más de 2000.

No bastaba la mera noticia de los episodios recogidos en relatos históricos. Necesitábamos una estimación de su tamaño. La práctica habitual admite la escala de magnitud-momento diseñada por Hiroo Kanamori, del Instituto de Tecnología de California, y Thomas C. Hanks, del Servicio Geológico de EE.UU., como la forma más fiable de medir el tamaño de los terremotos. Las escalas anteriores, así la de Richter, clasifican los terremotos en función de la amplitud de las distintas ondas sísmicas; esa puede variar, para un terremoto de una energía dada, según la frecuencia de la onda en la que se mida dicha amplitud. La escala magnitud-momento, por el contrario, se basa directamente en el proceso físico que acontece en el foco de un terremoto: el deslizamiento a lo largo de una falla.

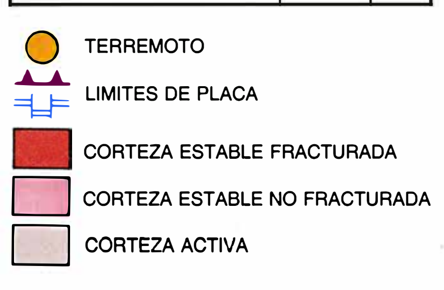
La escala se funda en el momento sísmico: el tamaño del par de fuerzas (dos fuerzas opuestas) que ocasionó la ruptura de la falla. El momento sísmico es igual al área de la superficie de ruptura multiplicada por el desplazamiento medio de las rocas a lo largo de dicha ruptura y por la rigidez de la roca. La magnitud-momento, simbolizada por **M**, es linealmente proporcional al logaritmo del momento; un episodio de **M** = 7 es 32 veces mayor que otro de **M** = 6 y 1000 veces mayor que un tercero de **M** = 5.

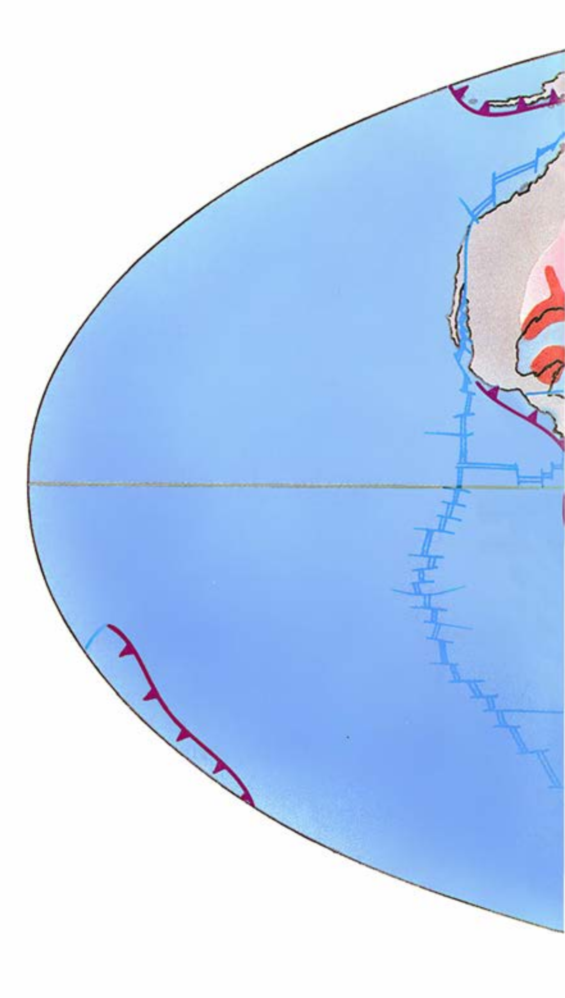
El momento sísmico puede calcularse aun cuando la falla que ha roto sea inaccesible, oculta bajo el agua o enterrada a una profundidad de muchos kilómetros. Gracias a las técnicas desarrolladas por Keiiti Aki, en la actualidad en la Universidad del Sur de California, y muchos otros investigadores, el momento sísmico de un terremoto y, por tanto, su magnitud-momento pueden determinarse a partir de las componentes de baja frecuencia de las ondas sísmicas, que los sismógrafos pueden registrar a distancia. Sin embargo, casi la mitad de los terremotos en continente estable de nuestra lista, y casi todos los de mayor tamaño, se produjeron antes de la invención del sismógrafo, a finales del siglo XIX. Tuvimos que desarrollar un método para estimar el momento sísmico a partir de los datos recogidos en relatos históricos: "áreas de intensidad", o descripciones de los efectos de un terremoto sobre las personas, los edificios y el paisaje con su extensión afectada.

Disponíamos, por suerte, de áreas de intensidad y de momentos sísmicos calculados directamente con los datos instrumentales relativos a más de 50 terremotos en continente estable. Mediante la aplicación de técnicas de regresión estadística a los datos, pudimos desarrollar para los terremotos en corteza estable una correlación entre las áreas de intensidad y el momento sísmico; de esta forma, podíamos asignar magnitudes-momento a otros episodios que carecían de datos instrumentales. Los mayores terremotos en continente estable que se han registrado resultaron ser los grandes seísmos localizados en Nueva Madrid, Missouri, durante el invierno de 1811-1812, que tuvieron una magnitud-momento entre **M** = 8,1 y **M** = 8,3.

Comparativamente, el mayor terremoto jamás registrado, ocurrido en Chile en 1960 en un borde de placa, alcanzó una magnitud de **M** = 9,5, es decir, fue 63 veces mayor. (Esta amplitud representa una energía equivalente a la de un huracán promedio pero liberada en 1 o 2 minutos en lugar de en 10 días.) Los episodios de Nueva Madrid, sin embargo, pueden haberse sentido en un área más extensa que cualquier otro terremoto de la historia; la roca firme del interior de las placas transmite las ondas sísmicas con mayor eficacia que la corteza fracturada que se encuentra cerca de los bordes de placa. Localizados a 1500 kilómetros de la costa, los temblores de Nueva Madrid dañaron edificios de la costa Este y ocasionaron la caída de los andamios levantados en el Capitolio de los Estados Unidos [véase "La zona sísmica del Mississip-

| EPISODIO | TIPO DE ESTRUCTURA | M |
|---|---|---|
| 1. Nueva Madrid, 1812 | rift | 8.3 |
| 2. Nueva Madrid, 1812 | rift | 8.2 |
| 3. Nueva Madrid, 1812 | rift | 8.1 |
| 4. Kutch, 1819 | rift | 7.8 |
| 5. Bahía de Baffin, 1933 | margen | 7.7 |
| 6. Estrecho de Taiwán, 1604 | margen | 7.7 |
| 7. Carolina del Sur, 1886 | margen | 7.6 |
| 8. Nanai, 1918 | margen | 7.4 |
| 9. Grand Banks, 1929 | margen | 7.4 |
| 10. Basilea, 1356 | rift | 7.4 |
| 11. Isla de Hainan, 1605 | rift | 7.3 |
| 12. Meseta de Exmouth, 1906 | margen | 7.2 |
| 13. Libia, 1935 | margen | 7.1 |
| 14. Portugal, 1858 | margen | 7.1 |
| 15. Tasmania del Sur, 1951 | margen | 7.0 |



**2. REGIONES ESTABLES: constituyen aproximadamente las dos terceras partes del total de la corteza continental. Al definir la corteza estable, los autores han excluido los límites de placa y las regiones amplias y difusas de deformación activa o reciente. Los 15 principales terremotos (en una escala de magnitud-momento, M) jamás registrados en la corteza estable (*arriba*) han ocurrido en su totalidad allí donde la corteza se ha estirado y adelgazado a lo largo de los últimos doscientos cincuenta millones de años.**

pi" por Arch C. Johnston; Investigación y Ciencia, junio de 1982].

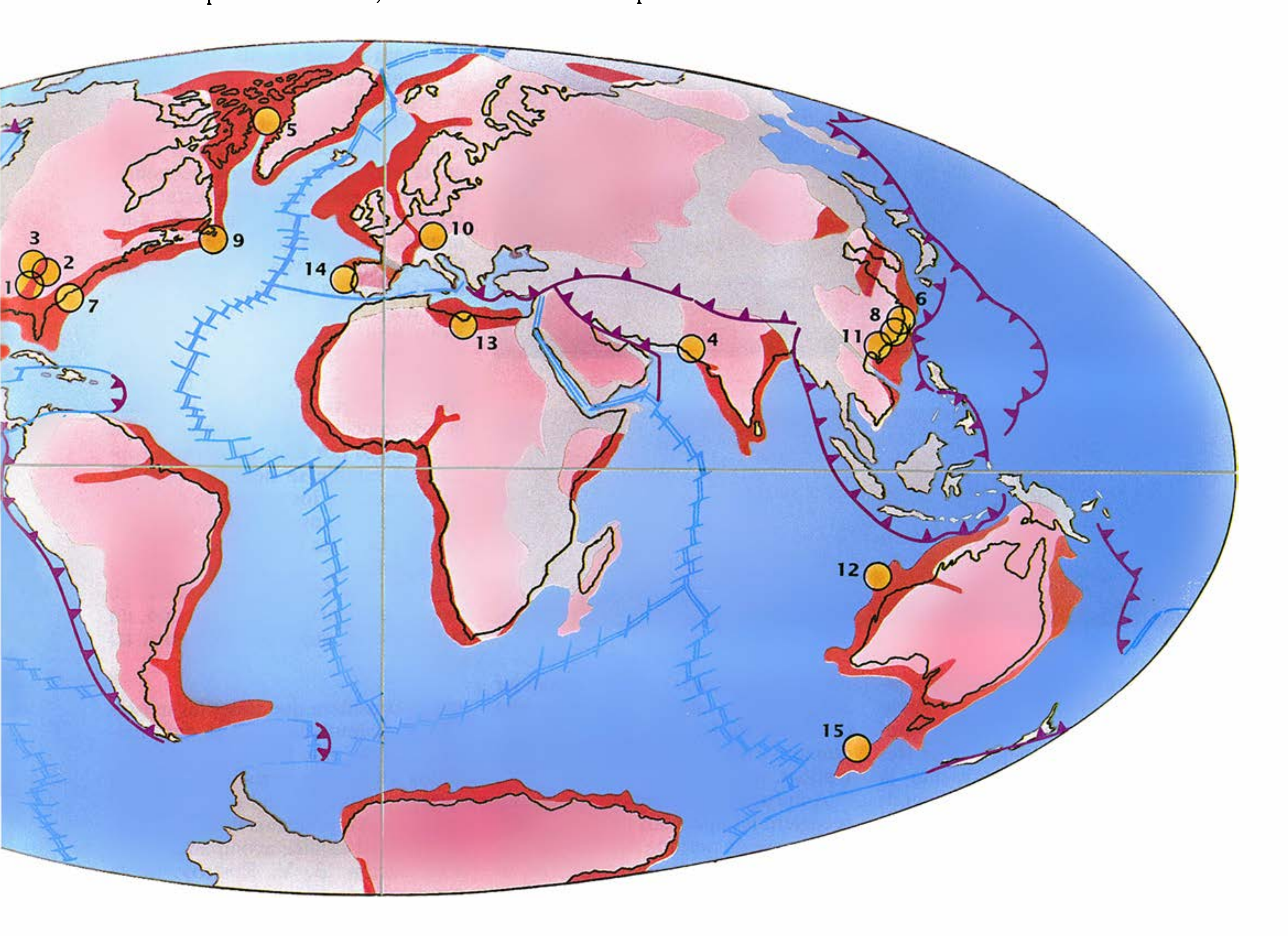
El terremoto de Kutch, en la India, de 1819 es el segundo en magnitud después del de Nueva Madrid, con **M** = 7,8, estimada a partir de áreas de intensidad no bien definidas. Este terremoto nos ofrece también una comprobación independiente de nuestra correlación empírica entre las áreas de intensidad y el momento sísmico. La ruptura de la falla de Kutch alcanzó la superficie, a diferencia de las fallas responsables de la mayoría de los terremotos en continente estable, que se encuentran profundamente enterradas bajo las capas de sedimentos que cubren gran parte de la vieja corteza.

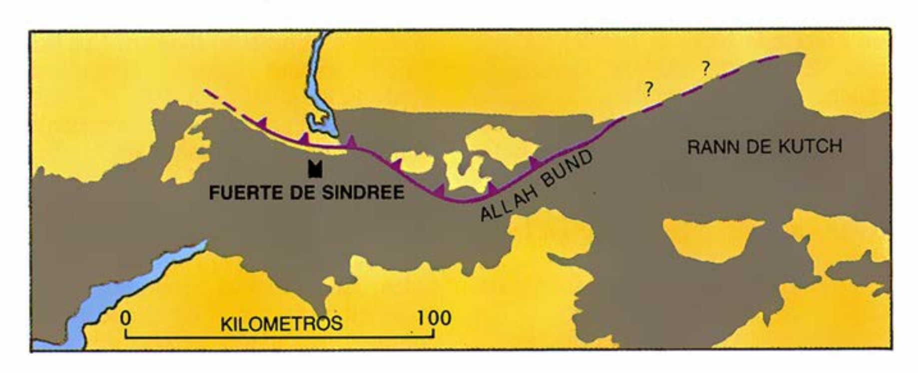
Los efectos fueron espectaculares. Se formó un escarpe de entre 6 y 9 metros de altura por una longitud mínima de 90 kilómetros; los lugareños la bautizaron con el nombre de Allah Bund, o "Pared de Dios". El terreno se elevó al norte del Allah Bund, mientras que, al sur, lo que había sido un *rann* —una llanura salada que se inundaba periódicamente—, situado a un nivel más bajo, se hundió todavía más. El Fuerte Sindree, construido mucho antes del temblor, se alzaba sobre una pequeña elevación del *rann*. Cuando el movimiento de la falla hundió la parte meridional, el fuerte se sumergió tanto que los soldados tuvieron que escapar en barca desde la torre más alta.

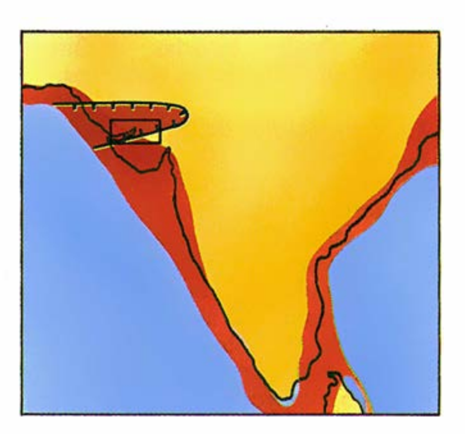
Podríamos resaltar que la coexistencia de un levantamiento y un hundimiento convirtió el episodio de Kutch en uno de los ejemplos más gráficos de la teoría del rebote elástico para la formación de las fallas. Esta teoría (cuya elaboración formal llegaría después del gran terremoto de San Francisco de 1906) sostiene que un terremoto es una liberación repentina de la tensión elástica acumulada en la roca; predice que la roca situada a ambos lados de la falla se moverá en sentidos opuestos. En Kutch, el nivel absoluto del mar sirvió de plano de referencia para destacar los desplazamientos verticales opuestos de la corteza.

Más aún, el evidente movimiento de la falla nos permitió calcular directamente el momento sísmico. Los británicos habían medido cuidadosamente la longitud de la falla y el deslizamiento. Para calcular el momento sísmico, también necesitábamos saber hasta qué profundidad se extendía la zona de ruptura, así como la rigidez de la roca, pero se pueden atribuir valores razonables para ambas magnitudes. El momento resultante podía variar en un factor de dos respecto del momento calculado a partir de la intensidad, lo que aumentó nuestra confianza en las estimaciones del momento sísmico basadas, exclusivamente, en documentos históricos.

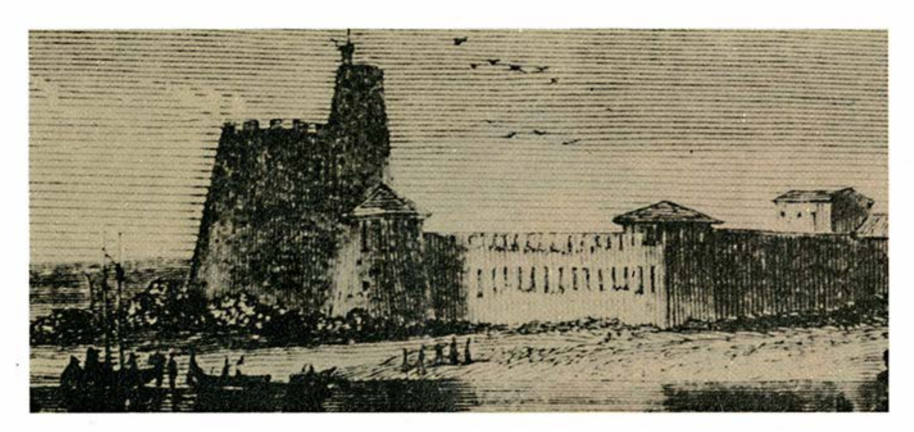
Los terremotos de Nueva Madrid y de Kutch no son nada más que los elementos más sobresalientes de una serie de datos de más de 800 episodios en continente estable de **M** = 4,5 o mayor. Este número puede parecer elevado, pero es el total de una relación global que abarca siglos o milenios. En tan sólo un año, ocurren muchos más terremotos de un valor **M** = 4,5 o mayor en bordes de placa. Para saber cómo se libera exactamen-

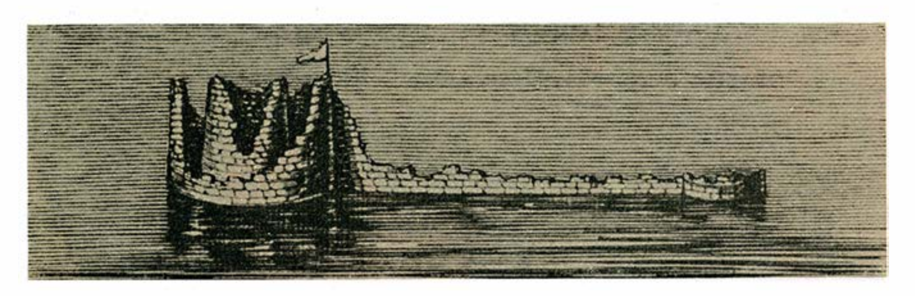




**3. TERREMOTO DE KUTCH de 1819.** Su carácter insólito, entre los terremotos intraplaca, debióse a que la ruptura de falla alcanzó la superficie. Produjo un escarpe de seis a nueve metros de altura (el Allah Bund) a través de la llanura salada conocida como el Rann de Kutch (*arriba*), en el oeste de la India (*izquierda*). Al norte, el terreno se levantó; al sur, se hundió. El Fuerte Sindree se alzaba sobre una elevación (*abajo*); después del terremoto sólo la torre quedó sobre el nivel del agua, como se ilustró desde otro ángulo 19 años más tarde (*parte inferior*). Los grabados pertenecen a la edición de 1853 de los *Principios de geología*, de Charles Lyell.





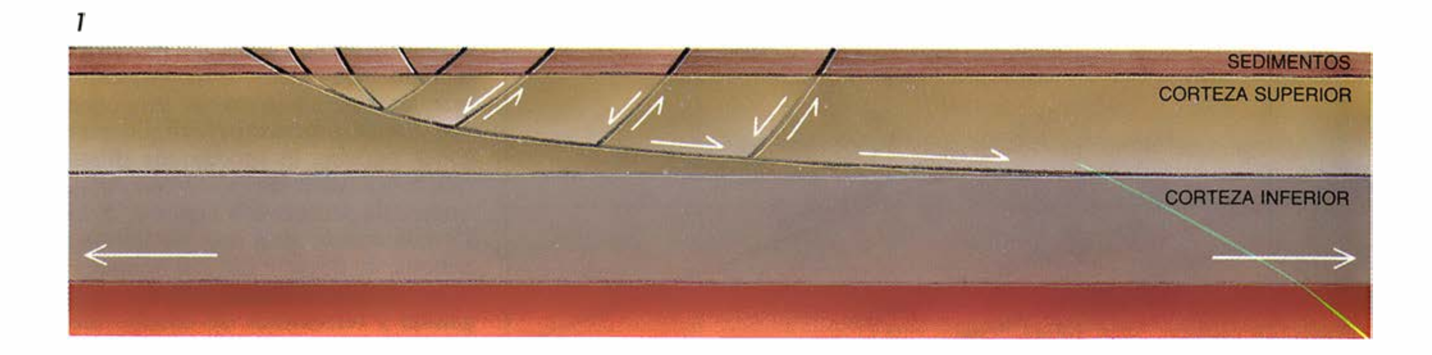
te el momento sísmico en la parte estable de los continentes, en comparación con la actividad sísmica mundial, construimos un diagrama de frecuencia-magnitud. Se representa la magnitud sísmica en el eje horizontal; en el eje vertical, el número de seísmos que igualan o exceden una magnitud dada. Si la escala del eje vertical es logarítmica, el diagrama de frecuencia-magnitud, para cualquier zona sísmica, dibuja una recta que desciende de los terremotos más pequeños, y más frecuentes, a los catastróficos, más escasos.

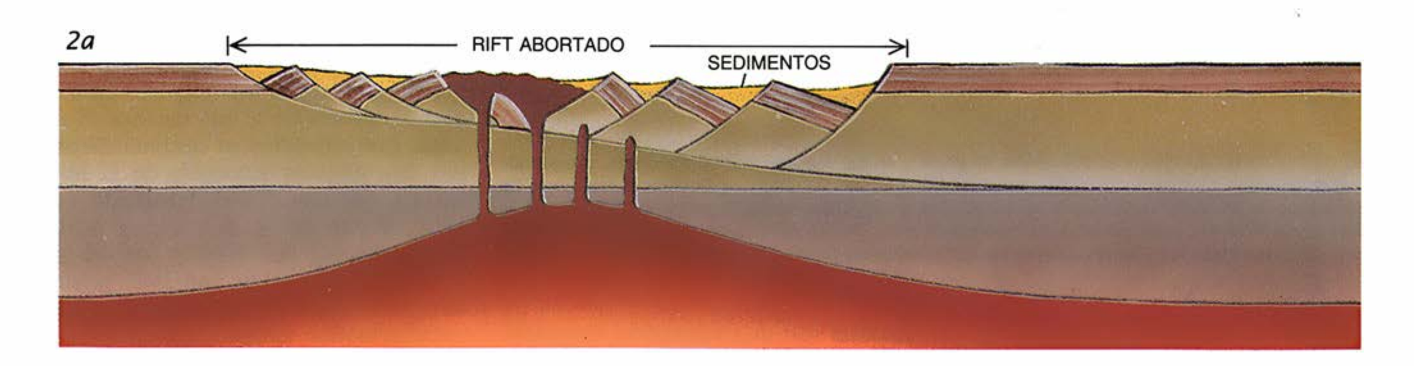
Aun cuando un catálogo sísmico no recogiera los episodios muy pequeños o abarcase un período demasiado corto para incluir los espectaculares, la relación constante entre frecuencia y magnitud significaría que la gráfica puede extrapolarse para estimar la frecuencia de terremotos en un amplio rango de magnitudes. Es correcto combinar, pues, los resultados para encontrar la sismicidad total —la cantidad que se libera de momento sísmico— para la región a la que corresponden los datos. Nuestros cálculos relativos a la corteza continental estable dieron una liberación de momento de aproximadamente $10^{26}$ dinas-centímetro (unidades convencionales de momento sísmico) por año, es decir, menos del 0,5 por ciento del total.

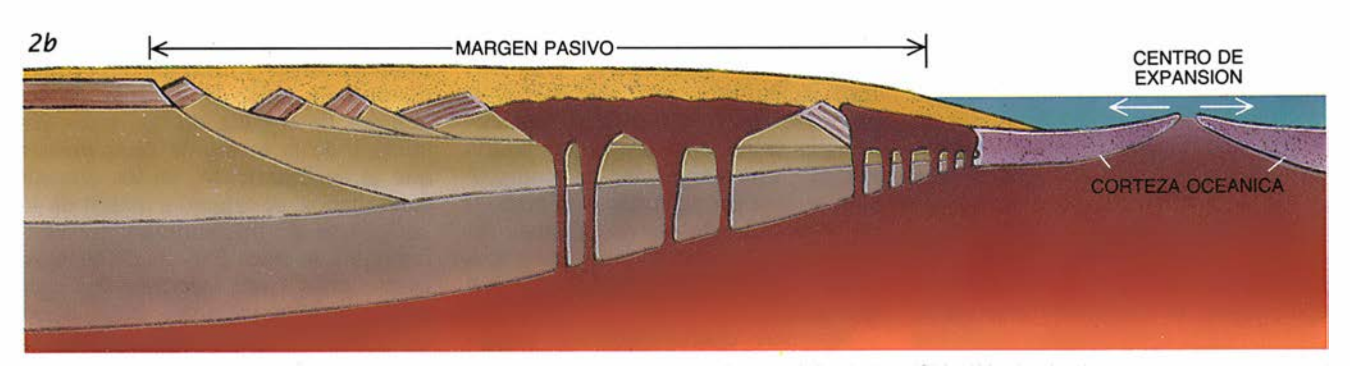
Ni que decir tiene que nuestra serie de datos es incompleta. Recoge probablemente todos los terremotos de magnitud mayor que **M** = 7 ocurridos durante el tiempo de registro. Pero pueden haberse pasado por alto temblores pequeños o de tamaño moderado ocurridos en regiones aisladas, lo que resta certidumbre al diagrama de frecuencia-magnitud. Aun así, existe una concordancia entre los valores de la sismicidad y otra fuente de información sobre procesos desarrollados en la corteza continental estable: las mediciones independientes del ritmo al que se está deformando la corteza estable.

Utilizando como referencia señales de satélites o de objetos astronómicos lejanos, los geofísicos pueden medir en la actualidad cambios pequeñísimos en las distancias entre estaciones receptoras separadas miles de kilómetros, a medida que la corteza se estira o comprime [véase "Geología por interferometría de muy larga base", por William E. Carter y Douglas S. Robertson; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, enero de 1987]. Para dos estaciones separadas por una zona de tectónica activa próxima a un borde de placa, la deformación puede suponer varios centímetros por año. La corteza continental estable se deforma también en respuesta a los esfuerzos compresivos que se transmiten desde los bordes de placa; las mediciones provisionales indican, sin embargo, que se trata de una fracción minúscula, en torno a una parte en $10^{10}$ por año, un milímetro en miles de kilómetros tal vez.

Si se considera que todas las tensiones acumuladas en esta deformación acaban por liberarse en terremotos (hipótesis razonable para la corteza quebradiza del interior de los continentes), podemos calcular cuánta actividad sísmica acompañaría a la deformación. B. V. Kostrov, de la Academia de Ciencias Soviética, ha



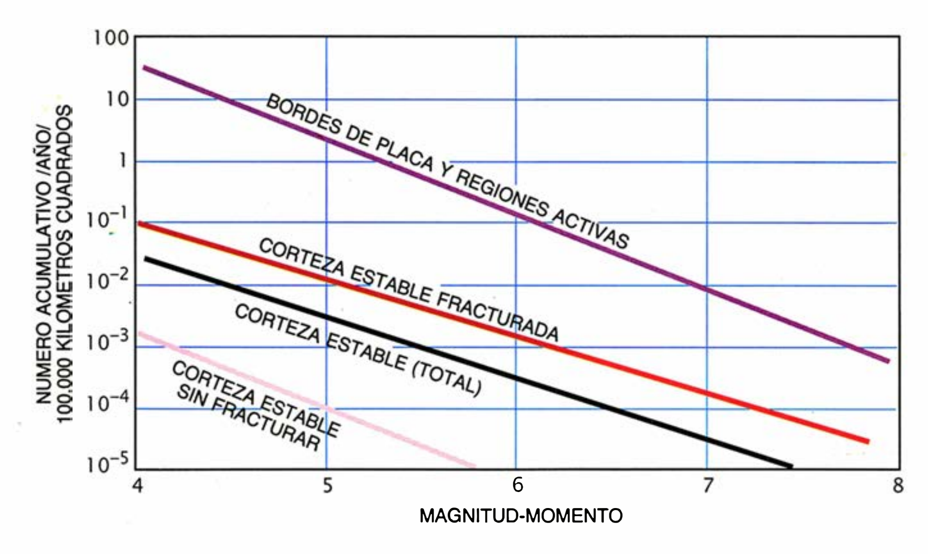

**4. CORTEZA FRACTURADA, región de los terremotos principales en corteza estable; se forma durante millones de años, al romper las fuerzas de extensión la corteza superior frágil en bloques separados por fallas activas (*1*). La dilatación o extensión continua adelgaza la corteza, permitiendo al magma aflorar. Si la extensión cesa, la corteza estirada se convierte en un rift abortado (*2a*), en el cual se acumulan nuevos sedimentos. Si la extensión prosigue, la corteza continental se rompe con el tiempo, dando lugar a un centro de expansión a partir del cual se crea nueva corteza oceánica. La corteza continental estirada se hunde, produciendo un margen pasivo cubierto de sedimentos (*2b*). (Dibujos de Ian Worpole.)**

demostrado que la tasa de momento liberado es, en ese caso, proporcional al volumen de corteza multiplicado por la tasa de deformación. Una velocidad de deformación de $10^{-10}$ por año predice una tasa de liberación de momento en la corteza continental estable que se ajusta bien a la calculada a partir de nuestra serie de datos sísmicos.

Nuestro valor de actividad sísmica en corteza estable es, en realidad, un promedio de una cantidad que varía mucho de un continente a otro. La Antártida y Groenlandia sufren pocos terremotos significativos, debido quizá a que la maciza capa de hielo existente estabiliza cualquier falla, impidiendo el deslizamiento. Las partes estables de Sudamérica y Asia (Siberia) son, desde el punto de vista sísmico, más tranquilas que las restantes regiones continentales estables. Es posible que estas variaciones reflejen




**5. REACTIVACION DE UNA FALLA millones de años después de formarse, en un proceso que se cree responsable de la generación de los grandes terremotos en continente estable. Las fallas creadas en la corteza continental por antiguas tensiones de extensión (*1*) pueden permanecer quiescentes durante millones de años, acumulando gradualmente un manto de sedimentos (*2*). Posteriormente, los esfuerzos compresivos dentro del interior de los continentes pueden reactivar la falla, que se desliza en otra dirección, vertical u horizontalmente, y genera entonces un terremoto (*3*).**




**6. ACTIVIDAD SISMICA en los bordes de placa y en las regiones activas asociadas, comparada con la actividad en distintos tipos de corteza estable mediante un diagrama frecuencia-magnitud. En los límites de placa, la frecuencia de los terremotos de cualquier tamaño centuplica, varias veces, la frecuencia de los desencadenados en las regiones estables. Dentro de la corteza estable, los terremotos ocurren más a menudo en las áreas de fractura; la correlación para los terremotos mayores es la mejor.**

diferencias en promedio de los niveles de tensión a escala continental, posibilidad susceptible de comprobación mediante comparaciones sistemáticas de las proporciones de deformación entre diferentes continentes.

La sismicidad varía también mucho dentro de áreas estables de un mismo continente. Para averiguar la razón, trabajamos con David B. Bieler, a la sazón en la Universidad de Memphis, en el análisis de la historia tectónica de las regiones continentales estables y su correlación con la distribución de terremotos. Se evidenció una característica de la corteza como condición previa y universal de los principales terremotos en continente estable.

Lo mismo que muchos sismólogos, esperábamos que los episodios de continente estable se asociaran a zonas específicas de debilidad en la corteza. Naturalmente, los terremotos en corteza estable son, en último término, el producto de las tensiones de compresión que se originan en los bordes de placa. Parecía, sin embargo, poco probable que las variaciones en el campo de tensiones dentro de un continente fueran la única explicación de la distribución de terremotos. Como han demostrado Mary Lou Zoback, del Servicio Geológico de EE.UU., Mark D. Zoback, de la Universidad de Stanford, y otros investigadores, a partir de estudios de cobertura mundial de fallas producidas por terremotos y de perforaciones en el basamento (que se deforman bajo la influencia del campo de tensiones reinante), las fuerzas de compresión que actúan en el interior continental son de orientación constante a lo largo de extensas áreas.

Diríase, pues, que los terremotos requerirían una región debilitada por la tectónica anterior, donde estos esfuerzos pudieran liberarse. Una corteza fracturada por viejas fallas, pensemos en una cadena montañosa antigua o un rift abortado, podría cumplir esta exigencia. La compresión que se propaga hacia el interior de un continente podría, algunas veces, reactivar estas viejas fallas y provocar deslizamientos que generaran temblores.

Nuestros descubrimientos confirmaron ampliamente este modelo de fallas reactivadas. Las zonas que han experimentado, alguna vez en el pasado, un fenómeno de extensión tales como márgenes pasivos y rifts abortados, poseen mayor probabilidad de sufrir un terremoto de cualquier tamaño que, por ejemplo, los antiguos escudos. De los más de 800 terremotos que hemos estudiado, casi la mitad (49 por ciento) se encuentran en este tipo de corteza adelgazada, aunque ésta sólo constituye la cuarta parte de toda la corteza continental estable.

La correlación mejora con el aumento de la magnitud. Mientras que sólo el 46 por ciento de los terremotos menores de **M** = 6 se producen en corteza dilatada, la cifra es del 60 por ciento para episodios cuyo valor oscila entre **M** = 6 y **M** = 7, para alcanzar el 100 por ciento para los episodios grandes, de **M** = 7 en adelante. Por ejemplo, debajo de donde se localizaron los terremotos de Nueva Madrid y Kutch existe un rift abortado; el terremoto de Charleston se desencadenó en un margen pasivo extendido. En todos estos episodios grandes y en la mayoría de los pequeños que se producen en rifts o márgenes pasivos, el proceso de dilatación o extensión fue relativamente reciente: de antigüedad superior a los 25 millones de años (por definición), aunque sin llegar a los 250 millones.

La correlación entre corteza adelgazada y terremotos de tamaño moderado habría sido más estrecha de no existir un continente lleno de excepciones: Australia. La vieja corteza inconsutil del oeste y centro de Australia ha sufrido varios terremotos que figuran entre los mayores episodios no asociados a una corteza dilatada. Los episodios se caracterizaron por una singular secuencia de 12 horas en Tennant Creek (ocurrido en 1988, y con **M** = 6,2, 6,3 y 6,6), en Meckering (en 1968 y con **M** = 6,6), y en Meeberrie (en 1941 y con **M** = 6,8); presentaron también otras peculiaridades. Como el terremoto de Kutch, y a diferencia de lo operado por la mayoría de los restantes episodios en continente estable, la ruptura alcanzó la superficie en los dos primeros casos y creó un importante escarpe de falla. El estudio de los tiempos de llegada de las ondas sísmicas y de la forma de éstas mostró que el deslizamiento, en los seísmos australianos, se originó a menos de 10 kilómetros de profundidad; frecuentemente, a sólo 2 o 3 kilómetros. Eran, pues, más superficiales que cualquier otro temblor bien documentado de nuestra serie de datos.

Sin embargo, los terremotos de mayor potencia y peligro que acontecieron en continente estable se dieron en corteza cuya extensión —o dilatación— se produjo bastante recientemente. Cabría quizás esperar este tipo de terremotos en zonas de colisión antigua: viejas regiones de corteza comprimida y plegada, como los Apalaches. Y eso es lo que encontramos en el caso de pequeños terremotos, mucho más frecuentes en este tipo de regiones que en corteza sin deformar, y algo más frecuentes los terremotos de tamaño moderado. Pero el modelo no es válido para los episodios mayores; tal vez, la rasgadura de la corteza prefiera propagarse hacia el interior más en las regiones extendidas que en las comprimidas.

Ahora bien, si el modelo de fallas reactivadas se bastara, por sí solo, para justificar todos los terremotos en continente estable, cabría esperar que los terremotos menores se agruparan en regiones de corteza adelgazada

con la claridad que observamos en los episodios mayores. La correlación mucho más débil de los terremotos pequeños con estas regiones plantea la posibilidad de que intervengan también otros mecanismos.

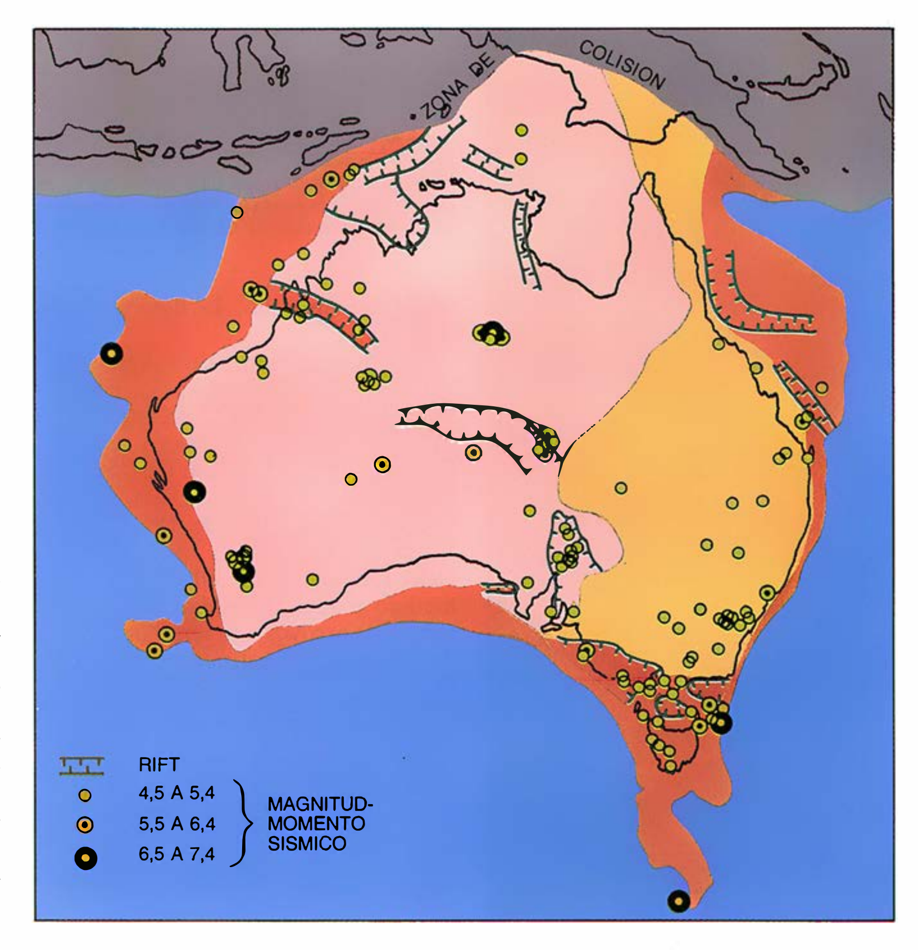
Mark Zoback ha propuesto un modelo alternativo para seísmos en continente estable, basándose en el trabajo anterior de Richard H. Sibson, de la Universidad de California en Santa Bárbara. En la hipótesis de Zoback, las tensiones de compresión descubiertas en la frágil corteza superior de los continentes vuelven a aparecer en la corteza inferior, a más de 20 o 25 kilómetros de profundidad. A esas honduras, las altas temperaturas y, quizá, las diferencias en la composición hacen que la corteza sea más dúctil que frágil. Ni se rompe ni se curva elásticamente bajo los esfuerzos; antes bien, fluye lentamente y, según sugiere Zoback, al ceder, incrementa las tensiones de la corteza frágil superior. Si esta deformación dúctil se concentrara en una pequeña región, los esfuerzos de la corteza superior podrían acumularse y desencadenar terremotos. Debido a que las propiedades de la corteza inferior, más que las de las rocas superficiales, determinarían la distribución de los terremotos, podría parecer que éstos se producen al azar, como ocurre con los episodios menores de nuestro registro.

El resultado más importante al que hemos llegado es el siguiente: los episodios principales no se producen al azar. Saber que se concentran en rifts abortados o en márgenes pasivos constituye un buen comienzo a la hora de acotar las zonas de riesgo sísmico. Pero no tiene punto de comparación con la precisión que alcanzan los sismólogos cuando delimitan zonas proclives a los temblores en la vecindad de los bordes de placa, donde la superficie del terreno evidencia fallas activas que se rompen de manera frecuente y regular. La verdad es que podemos determinar, para muchas fallas de borde de placa, un intervalo de recurrencia aproximado de los terremotos mayores, cifrado en algún caso en sólo 40 años. En consecuencia, aunque tales terremotos no puedan predecirse todavía con una precisión de horas o días, sí admiten, en ocasiones, cierto pronóstico. Así, a propósito del segmento de falla responsable del terremoto ocurrido el pasado año al sur de San Francisco, se afirmó en 1988 que generaría, con bastante probabilidad, un gran terremoto dentro de un intervalo temporal de 30 años.

El pronóstico de episodios en continente estable —por no hablar de su predicción— es un problema difícil. Las fallas enterradas profundamente, que desencadenan la mayoría de los mismos, no pueden identificarse en superficie ni se delatan por fracturas frecuentes. De los 15 terremotos de nuestro catálogo con **M** = 7 o mayor, ninguno fue repetición de un episodio de proporciones similares registrado con anterioridad. (Siempre que los tres terremotos de Nueva Madrid de 1811 y 1812 se computen como uno solo.)

Si los terremotos en continente estable obedecen o no a un modelo periódico es una cuestión a dilucidar. En caso afirmativo, el intervalo de recurrencia debe ser mayor que en los bordes de placa, mucho mayor quizás. En efecto, las mediciones tomadas desde el espacio de la deformación lentísima que se advierte en el interior de las placas apoyan la idea según la cual los grandes terremotos podrían repetirse en un lugar sólo a intervalos de miles de años. (Es también posible, no obstante, que, si esta deformación intraplaca se concentra en unas pocas zonas de corteza débil, los terremotos se repitan con más frecuencia allí. En este sentido, algunos investigadores estiman que, en Nueva Madrid, los terremotos mayores, de la potencia de los de 1811 y 1812, podrían repetirse con una frecuencia de sólo 500 años.)

La esperanza más sólida en la determinación de intervalos de recurrencia reside en la aportación de una disciplina todavía en desarrollo, la paleosismología, que estudia los terremotos prehistóricos. Aun cuando la propia falla sísmica esté enterrada, el episodio importante puede dejar huellas duraderas en el lugar, tales como deslizamientos de tierra y capas de suelo deformadas. Esos procesos suelen incluir materia orgánica atrapada —raíces de árboles del suelo removido— que posibilita aplicar, en el es-




**7. AUSTRALIA es un continente salpicado de terremotos; se halla formado, íntegramente, por corteza estable: un núcleo antiguo (*rosa*) rodeado por una corteza algo más joven (*naranja*) y márgenes pasivos (*rojo*). Una región de colisión de placas, que aún continúa, limita Australia por el norte. En Australia se cumple la regla general de que los grandes terremotos en continente estable ocurren dentro de la corteza que ha sufrido extensión reciente; ahora bien, los grandes temblores de la costa continental han acontecido en rocas antiguas que no han sufrido procesos de rift y han producido fallas superficiales. El mapa, que señala episodios recientes e históricos, está basado en otro correspondiente a una serie preparada para todas las regiones continentales estables de la Tierra.**



**8. EN LA LICUEFACION DEL SUELO se apoyan los sismólogos para datar un terremoto prehistórico grande. Cuando un temblor intenso sacude el suelo arenoso y saturado de agua, sube la presión de ésta, y el suelo se vuelve un líquido viscoso que puede irrumpir en la superficie a través de las capas superiores. En el suelo alterado puede quedar atrapada materia orgánica, datable por carbono. En esta excavación del norte de Charleston, Carolina del Sur, el "soplo de arena" de la derecha (fechado a partir de fragmentos de corteza de árbol) tiene aproximadamente 950 años, mientras que el de la izquierda ronda los 1900 años. Los responsables de los terremotos tenían una fuente diferente de la del terremoto de Charleston de 1886. (Robert Gelinas y David Amick, Ebasco Service.)**

tudio del episodio, la datación por carbono.

Las investigaciones de antiguos rasgos de licuefación del suelo, acometidas en la zona de Charleston, han sugerido que un terremoto anterior precedió en 1100 años al de 1886. En Oklahoma, Anthony J. Crone, del Servicio Geológico de los Estados Unidos, y Kenneth V. Luza, del Servicio Geológico de Oklahoma, han medido y datado desplazamientos de cursos de arroyos a lo largo de la falla de Meers (una estructura caracterizada por un escarpe de 3 a 5 metros de altura que recorre más de 25 kilómetros en el seno de un rift abortado). La falla de Meers ha permanecido quiescente en tiempos históricos, pero la paleosismología revela que, hace unos 1200 años, se produjo allí un terremoto de aproximadamente **M** = 7.

A modo, pues, de conclusión, podemos afirmar que, en lo relativo a lugares ya identificados por un terremoto histórico o una falla visible, pronto cabrá decir algo sobre la frecuencia de grandes episodios, conocimiento que constituye el primer paso hacia su previsión y la estimación del riesgo sísmico. Para el resto de la corteza continental estable, nuestro estudio pergeña un cuadro aproximado de la variación del riesgo sísmico con la historia de la corteza. También nos advierte que, incluso en el corazón tranquilo de los continentes, el término "estable" es un término relativo.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA


INTRAPLATE SEISMICITY, REACTIVATION OF PREEXISTING ZONES OF WEAKNESS, ALKALINE MAGMATISM, AND OTHER TECTONISM POSTDATING CONTINENTAL FRAGMENTATION. Lynn R. Sykes en *Reviews of Geophysics and Space Physics*, vol. 16, n.º 4, págs. 621-688; noviembre de 1978

SEISMICITY OF 'STABLE CONTINENTAL INTERIORS.' Arch C. Johnston en *Earthquakes at North-Atlantic Passive Margins: Neotectonics and Postglacial Rebound.* Dirigido por Søren Gregersen y Peter W. Basham. Kluwer Academic Publishers, 1989.

METHODS FOR ASSESSING MAXIMUM EARTHQUAKES IN THE EASTERN UNITED STATES. Kevin J. Coppersmith, Arch R. Youngs y Ann G. Metzger en *EPRI Report RP-2556-12*. Electric Power Research Institute, 1990

# Vertebrados suspensívoros

*Los animales que obtienen su alimento filtrándolo del agua pueden recolectar abundante plancton y crecer en gran número o alcanzar un tamaño enorme*

S. Laurie Sanderson y Richard Wassersug

Renacuajos, arenques, tiburones peregrinos, flamencos, ánades reales y rorcuales azules forman una familia inverosímil. En el grupo se cuentan los vertebrados vivos más pequeños y los mayores, e incluye anfibios, peces, aves y mamíferos. Todos estos organismos son suspensívoros: comen mediante el trasiego de enormes volúmenes de agua a través de sus aparatos alimentarios y filtrando pequeños organismos y fragmentos de material orgánico.

Los vertebrados suspensívoros subsisten nutriéndose de plantas y animales minúsculos, demasiado pequeños para ser percibidos y capturados uno a uno. Por lo general engullen muchas partículas alimenticias durante cada acción alimentaria; no son selectivos con lo que comen. Por ejemplo, un tiburón peregrino de 10 metros de longitud puede ingerir más de 540 litros de zooplancton al día: millones de minúsculos animales, cada uno de ellos de no más de un milímetro de longitud. En una hora atraviesan la boca del tiburón por lo menos 1850 metros cúbicos de agua. Los peces suspensívoros menores, como el menhaden y la carpa cabezuda, suelen consumir fitoplancton (plantas microscópicas), de sólo unas 10 micras de diámetro. Algunos renacuajos pueden extraer del agua partículas del tamaño de las bacterias; para subsistir con esta dieta pueden precisar el trasiego de un volumen de agua igual a su propio volumen corporal cada pocos minutos.

Los peces suspensívoros revisten interés ecológico y económico, porque ocupan una posición baja en la pirámide trófica (la cadena alimentaria). Las plantas (el fitoplancton y las formas mayores) constituyen la base de la pirámide: los herbívoros se sitúan en el segundo nivel, los carnívoros que se alimentan de ellos en el tercero, y así sucesivamente. Cada nivel sucesivo de la pirámide supone menos biomasa que el nivel inmediato inferior. Sólo alrededor del 10 por ciento del alimento que consume un depredador determinado se incorpora a su biomasa; el resto se destina al metabolismo básico y a la persecución y captura de las presas, entre otros trabajos. La mayoría de suspensívoros son, o bien herbívoros, o bien carnívoros que consumen zooplancton herbívoro, por lo que sus poblaciones pueden dar razón de una extraordinaria cantidad de biomasa. Las especies suspensívoras como los boquerones, los arenques y las carpas suponen más de un tercio de la captura anual de peces marinos y dulceacuícolas. Los enormes recursos alimentarios de que disponen los suspensívoros pueden sostener, asimismo, organismos imponentes; el mayor animal que nunca ha existido, el rorcual azul, vive de krill, crustáceos herbívoros del zooplancton.

El suspensivorismo, uno de los métodos de alimentación más extendidos, figura también entre los más antiguos. R. Glenn Northcutt, de la Institución Scripps de Oceanografía, y Carl Gans, de la Universidad de Michigan, han propuesto la hipótesis según la cual los primeros vertebrados fueron suspensívoros. Las larvas de algunos vertebrados ancestrales subsistieron quizá con plancton (como hoy día hacen los renacuajos) y luego se metamorfosearon en carnívoros que nadaban activamente. En un tal escenario, determinadas características –pensemos en los órganos sensoriales especiales y pautas eficientes de locomoción acuática– evolucionaron al tiempo que los animales pasaban de la alimentación suspensívora a la captura activa de presas mayores.

Aunque es muy probable que los vertebrados depredadores modernos que muerden o engullen presas individuales evolucionaran a partir de antepasados suspensívoros, ello no significa que los suspensívoros modernos sean reliquias que la evolución haya pasado por alto. La diversidad del suspensivorismo sugiere que este mecanismo alimentario ha sido adoptado repetidas veces durante la evolución, gracias a su idoneidad para capturar las grandes cantidades de comida disponibles en bajas concentraciones en ambientes acuáticos dispares. Además de las complejas estructuras filtradoras que han ido evolucionando para atrapar las partículas alimenticias, los suspensívoros han desarrollado cuerpos, cuellos, cabezas y mandíbulas especializados para llevar a cabo sus hábitos alimentarios particulares. La evolución convergente del suspensivorismo en estirpes distantes ofrece una oportunidad apasionante para analizar las estructuras particulares que corresponden a los distintos modos de alimentación por filtración.

Recientemente emprendimos una revisión de los mecanismos de alimentación de todos los vertebrados suspensívoros conocidos con el fin de correlacionar características estructurales y métodos de alimentación. Nos concentramos en la identificación de los rasgos que compartían los suspensívoros de estirpes evolutivamente di-

S. LAURIE SANDERSON y RICHARD WASSERSUG se conocieron hace 12 años, cuando Wassersug explicaba un curso de introducción a la biología al que Sanderson se apuntó. Sanderson es ahora becaria postdoctoral en biología ambiental de la Fundación Nacional de la Ciencia, en la Universidad de California en Davis, donde estudia la hidrodinámica y la ingestión de alimento en peces suspensívoros. En 1988 pasó dos semanas viviendo bajo el agua, a 14 metros de profundidad, en el hábitat de investigación que la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de los Estados Unidos tiene en el Caribe. Wassersug es profesor de anatomía en la Universidad Dalhousie en Halifax, Nueva Escocia. Investiga la morfología funcional de los renacuajos con el objeto de dilucidar su evolución.

vergentes; tales similaridades podrían ofrecernos pistas acerca de los mecanismos físicos implicados en la alimentación por filtración.

Separamos los suspensívoros en dos grandes grupos: los embestidores, que se basan en el movimiento hacia delante para introducir agua en la boca, y los suctores, que succionan en el agua mientras permanecen esencialmente inmóviles. Esta distinción radical se prolonga allende las líneas taxonómicas, para centrarse en los diversos modos en que los organismos transportan agua a sus superficies filtrantes. Aunque se tiende a asociar suspensivorismo con adaptaciones craneales (mandíbulas de tamaño exagerado), la especialización locomotora no reviste importancia secundaria. Un animal que proporciona agua a sus estructuras alimentarias mediante el movimiento hacia adelante no necesita una bomba oral muscular compleja; sus especializaciones craneales para el suspensivorismo (aparte de la proliferación de los propios filtros) pueden ser, pues, relativamente menores.

Embestidores y suctores se dividen, a su vez, en suspensívoros continuos, cuando por su boca pasa agua continuamente, y suspensívoros intermitentes, si tragan sucesivas bocanadas de agua y extraen cada vez el alimento antes de volver a llenar la boca. Los suspensívoros suctores continuos permanecen quietos mientras comen. Ello requiere drásticas adaptaciones craneales: no sólo un mecanismo de bombeo, sino también válvulas que aseguren que el agua fluye sólo en una dirección al atravesar los filtros. No debe sorprendernos que los vertebrados mejor diseñados para la locomoción acuática ininterrumpida sean embestidores, mientras que los que no nadan de forma continua, como aves, renacuajos y larvas de lamprea, hayan desarrollado mecanismos de alimentación por succión.

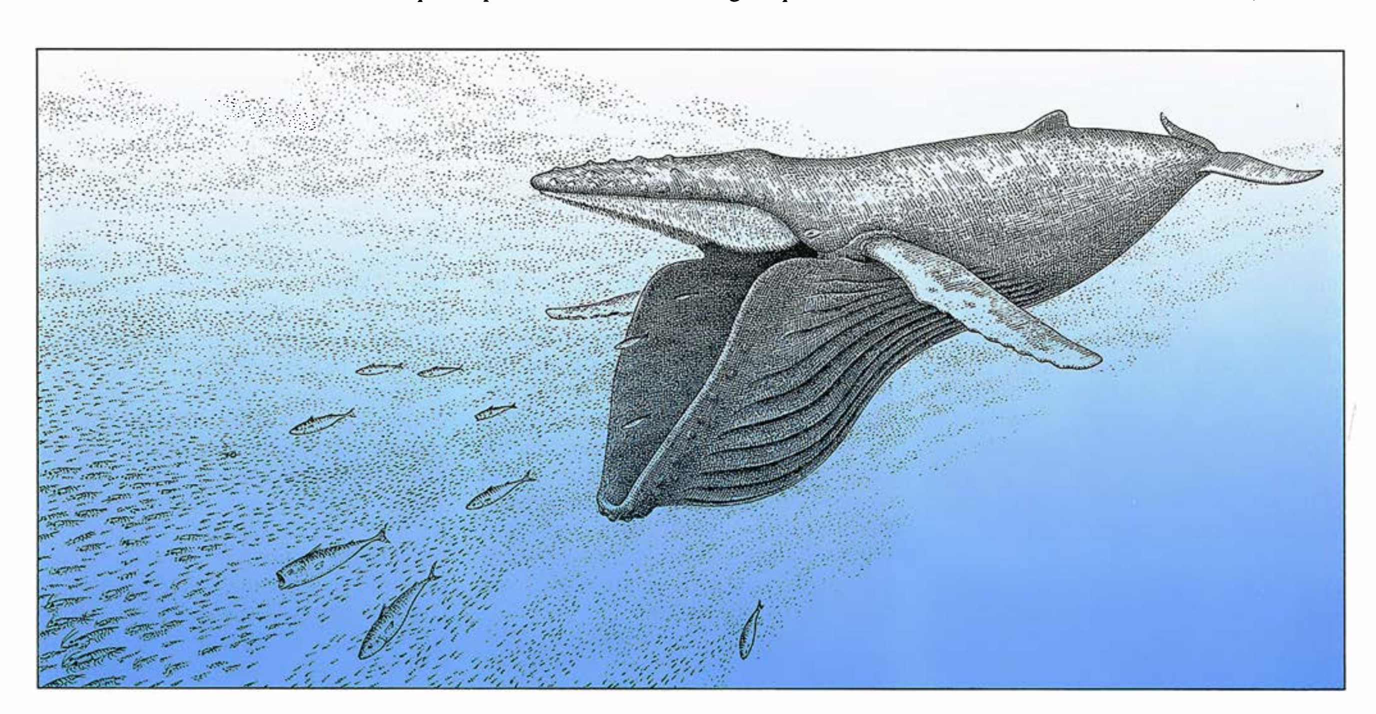
Los embestidores continuos constituyen la categoría de vertebrados suspensívoros más extensa: cuenta con más de 20 especies diferentes de peces, entre ellos las espátulas, las mantas, el tiburón peregrino, el tiburón ballena, el tiburón boquigrande y ciertos boquerones, arenques, sardinas y caballas. Los peces de esta categoría nadan hacia delante con la boca completamente abierta, permitiendo que el agua fluya por las hendiduras branquiales en la parte posterior de la cabeza, a través de estructuras filtradoras finamente ramificadas. Se les ha llamado filtradores de red porque su método de alimentación resulta similar al funcionamiento de las redes de plancton que utilizan los oceanógrafos.

Los embestidores intermitentes utilizan su velocidad de avance para forzar la abertura de la boca y llenan rápidamente la cavidad oral en un único pulso. Sólo algunas de las grandes ballenas, los rorcuales, alcanzan tamaño suficiente para practicar la alimentación de embestida intermitente. La eficacia de esta estrategia demanda que las fuerzas de inercia sean muy potentes; es decir, el agua que contiene las presas no debe desplazarse mientras la ballena avance y su boca se abra engullendo simultáneamente agua y presa.

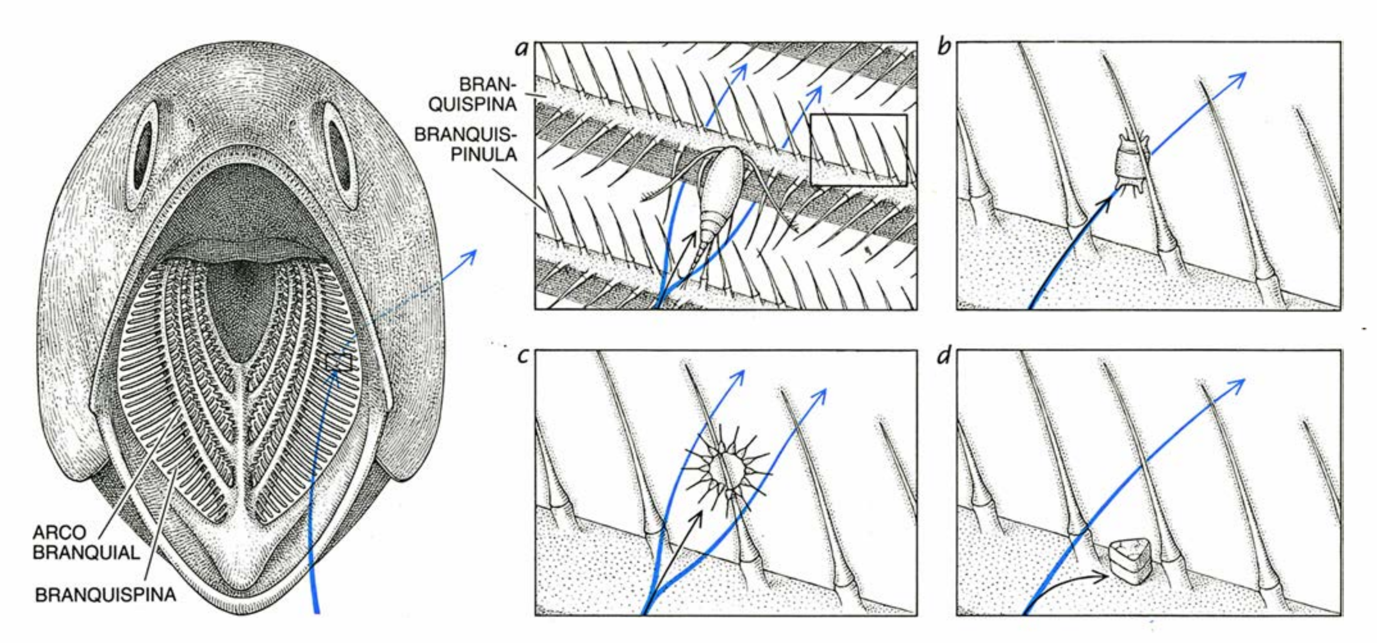
Los embestidores presentan estructuras corporales similares, aunque su tamaño puede variar en diversos órdenes de magnitud. Los suctores constituyen un grupo mucho más dispar. Pertenecen al mismo larvas de lamprea (amocetes), renacuajos, ánades, flamencos y determinados peces óseos. Amocetes, renacuajos, ánades y flamencos poseen en común una bomba oscilante en la garganta y la base de la boca que genera corrientes alimentarias mientras los animales permanecen quietos.

El sistema alimentario de amocetes y renacuajos está estrechamente ligado a su aparato respiratorio: las superficies de captación internas forman parte del sistema branquial. En cambio, en las aves suspensívoras las superficies de captación son anatómicamente independientes de las superficies respiratorias; para filtrar su alimento del agua, ánades y flamencos se sirven de lamelas, finas estructuras pectiniformes que se hallan en los bordes del pico. Ambos grupos se alimentan de partículas que son minúsculas en relación a su propio tamaño. Uno de los autores (Wassersug) ha descubierto que ciertos renacuajos llegan a la metamorfosis alimentándose sólo de organismos unicelulares de menos de 10 micras de diámetro.

Los suctores intermitentes, el últi-



**1. RORCUAL que se alimenta de un cardumen de krill y de caballas, peces que a su vez son suspensívoros. Esta yubarta, un embestidor intermitente, arremete hacia delante para engullir una enorme bocanada de agua que contiene muchos peces y crustáceos. Luego, cierra la boca y expele el agua mientras los flecos de las barbas que penden del cielo de la misma retienen atrapadas las presas. La caballa, en cambio, es un embestidor continuo.**




**2. BRANQUISPINAS** de un pez suspensívoro; extraen del agua las partículas alimenticias y las dirigen al esófago del animal. El agua penetra por las branquispinas y sale por entre los arcos branquiales. Hay tres mecanismos que pueden explicar la captura de partículas alimenticias demasiado pequeñas para ser atrapadas por el simple tamizado (*a*): intercepción directa mediante superficies pegajosas (*b*), impacto de inercia sobre estructuras que desvían el flujo de agua (*c*) y deposición gravitacional, en la que las partículas densas se depositan y separan del flujo de agua (*d*).

mo grupo de nuestra clasificación, no han progresado mucho en su especialización; difieren poco de la miríada de peces planctófagos no suspensívoros que localizan visualmente las presas individuales y las atrapan mediante succión. Los suctores intermitentes se distinguen principalmente por no alterar su velocidad o dirección de natación para fijar su atención en organismos individuales del plancton.

La succión intermitente se encuentra a medio camino entre la embestida continua y la succión de presas individuales. En función de las condiciones de alimentación, un suctor intermitente puede tender más hacia un extremo o hacia otro de dicho rango de variación. El depredador cuyas mandíbulas se abran lo suficiente para engullir más de una presa típica cada vez, puede dedicarse a la succión intermitente cuando las presas están demasiado dispersas o poseen un tamaño excesivo para una alimentación de embestida continua. La luz puede influir también: el sábalo de aletas filamentosas, por ejemplo, recurre a la succión intermitente en completa oscuridad, pero bajo una luz de luna clara busca visualmente y ataca a presas grandes que vagan solitarias.

¿Cómo separa un suspensívoro sus presas de los enormes volúmenes de agua que atraviesan su boca? El mecanismo de separación mejor conocido de cualquier vertebrado suspensívoro quizá sean las barbas, o ballenas. Las presas quedan enmarañadas en los flecos hirsutos de las placas de ballenas que descienden de los márgenes del cielo de la boca de los cetáceos misticetos. La ballena es flexible y, así, la porosidad de sus flecos debe variar en función de factores hidrodinámicos (presión del agua y dirección del flujo). La rigidez de los flecos difiere de unas especies a otras en razón de sus hábitos alimentarios. Las ballenas grises, que se alimentan de material grosero y abrasivo del fondo del mar, tienen placas rígidas, gruesas y breves con flecos cortos e hirsutos. En el extremo opuesto, los rorcuales norteños, que prefieren minúsculos copépodos a presas mayores, tienen flecos mucho más finos y densos.

Sabemos que las barbas y otros filtros biológicos similares separan el agua de las presas, pero ello no basta. ¿Cómo lo hacen? Michael C. LaBarbera, de la Universidad de Chicago, basando sus argumentos en la morfología de las estructuras alimentarias, ha sugerido que los filtros de los peces suspensívoros y de los cetáceos misticetos operarían a modo de tamices: el espaciamiento de los elementos filtrantes es menor que el tamaño de buena parte de las presas. Pero muchos vertebrados suspensívoros retienen partículas que pasarían fácilmente entre los elementos de sus dispositivos filtrantes.

Los filtros estáticos oponen, además, una gran resistencia al flujo de agua y se obstruyen rápidamente. Los ingenieros industriales han descubierto que, en muchos casos, intervienen otros mecanismos más eficaces que el tamizado; en los vertebrados dichos mecanismos pueden operar por separado o junto con el tamizado. Los principales mecanismos son la intercepción directa, en la que las partículas que tocan una estructura alimentaria pegajosa (cubierta de mucus) se adhieren a ella; el impacto de inercia, en el que partículas que son ligeramente más densas que el fluido circundante golpean la estructura alimentaria mientras el fluido se desvía para pasar rodeándola; la deposición gravitacional, en la que los objetos más densos que el agua se depositan separándose de la corriente que fluye, y la captación electrostática, en la que superficies alimentarias cargadas retienen de preferencia partículas de una cierta carga o determinado grado de atracción hidrófoba.

Daniel I. Rubenstein, de Princeton, y Mimi A. R. Koehl, de Berkeley, han avanzado la hipótesis siguiente: el impacto de inercia puede darse en ballenas y grandes peces que se libran a la embestida continua allí donde las partículas alimenticias alcanzan particular magnitud y densidad y las velocidades de flujo son elevadas. El mucus que se encuentra en los filtros de las larvas de lamprea, en renacuajos y algunas especies de peces indica, asimismo, mecanismos de captura distintos del tamizado. En los renacuajos, por ejemplo, los órganos revestidos de mucus y denominados trampas alimentarias branquiales, situados sobre las branquias, recolectan partículas alimentarias en suspensión, aunque no sean porosas.

De nuestro estudio ha surgido un modelo claro de acuerdo con el cual los filtros en los vertebrados suspensívoros serían invariablemente flexibles; su tamaño de poro no permanecería fijo. Hasta los filtros relativamente rígidos, como las branquispinas de los peces y las lamelas de las aves, varían en porosidad según los arcos branquiales se muevan hacia la línea media del cuerpo o se alejen de ella, o según el movimiento de abertura o cierre del pico. Los filtros de ballenas y renacuajos se disponen de manera que la presión del agua que los atraviesa cambie su porosidad. (La presión, naturalmente, se ve afectada a su vez por la densidad de las presas y de otros materiales en los filtros.) Todos estos factores hacen variar el flujo microscópico e impiden establecer qué mecanismos de captación resultan eficaces en cada instante considerado.

Cada uno de nuestros cuatro grupos de suspensívoros ha desarrollado distintas adaptaciones anatómicas. Los embestidores continuos tienen una cabeza enorme: supone del 25 al 28 por ciento de la longitud total del cuerpo en el tiburón peregrino, el tiburón boquigrande y el tiburón ballena, por ejemplo. La cabeza de las ballenas alcanza hasta un tercio de la longitud del cuerpo.

A pesar de su enorme testa, los embestidores continuos (tiburones y ballenas) poseen un cerebro que proporcionalmente es menor que el de sus parientes no suspensívoros. Asimismo presentan órbitas y ojos de tamaño reducido; dirigen los ojos hacia los lados, no hacia delante; después de todo, la visión no es un factor importante en la captura de sus presas. Sin embargo, algunos suspensívoros menores (boquerones y caballas) tienen órbitas grandes; la órbita ocupa hasta la mitad de la longitud del cráneo de la caballa atlántica. Estas especies pasan de alimentarse por embestida a alimentarse de presas individuales, en función del tamaño, densidad y localización de las presas.

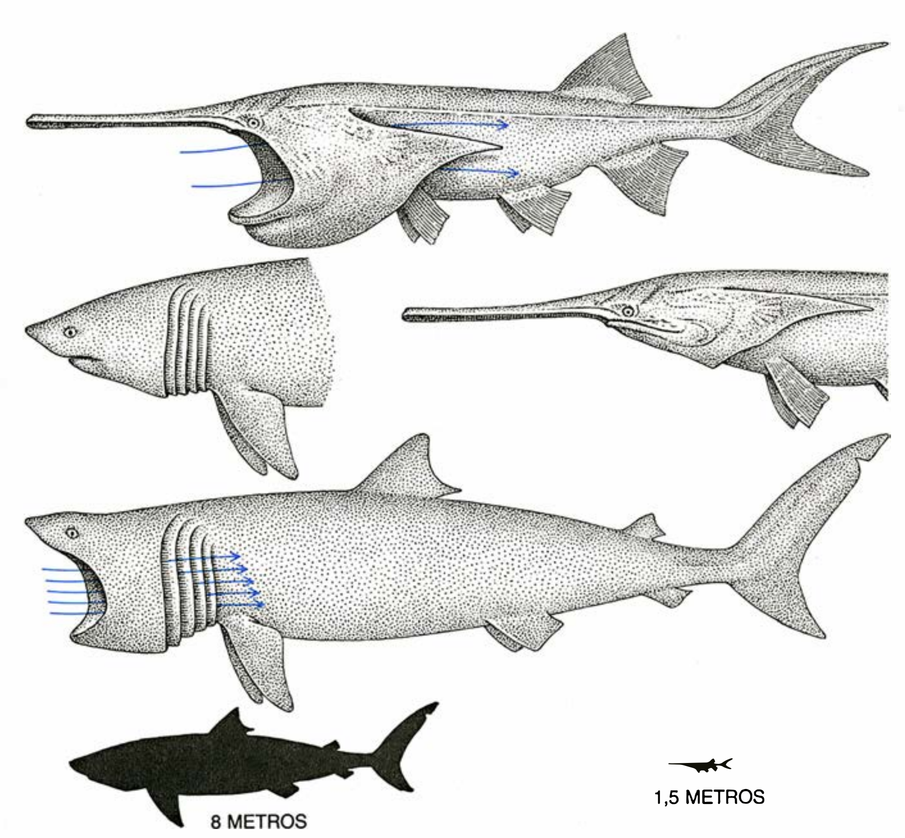
Los cetáceos misticetos constituyen un ejemplo de hasta dónde puede llegar la adaptación de un organismo a la alimentación de embestida continua. La cabeza es enorme en comparación con los cetáceos odontocetos. En la parte posterior del cráneo hay una amplia zona inclinada que sirve de punto de fijación para los músculos dorsales; deben éstos contraerse para resistir el momento de torsión hacia abajo ejercido por la presión del agua cuando la boca está abierta. La forma del cráneo reduce el momento de torsión que la musculatura ha de contrarrestar; los huesos se arquean hacia arriba y hacia atrás; así, cuando la boca se halla abierta, se encuentra alineada con el eje longitudinal de la columna vertebral. Además, las ballenas tienen proporcionalmente el cuello más corto de todos los mamíferos. Las vértebras cervicales están fusionadas, lo que limita mucho el movimiento de la cabeza.

Amén de los cambios morfológicos del cráneo, los embestidores continuos tienen menos dientes y menores que sus parientes, si no carecen en absoluto de ellos (como ocurre con las ballenas). Los huesos de las mandíbulas superior e inferior se hallan también adaptados al suspensivorismo; pueden ser alargados y ensanchados, si se comparan con los de parientes no suspensívoros. Sin embargo, no suelen hallarse engrosados ni están intensamente osificados. Esta cualidad se corresponde con su carácter menos exigente como reguladores del flujo de entrada del agua; no cumplen ninguna función activa en la captura o masticación de la presa.

Los peces embestidores continuos se distinguen por su complejo aparato branquial. En la caballa india, por ejemplo, las branquispinas pectiniformes (elementos que retienen partículas alimenticias al pasar el agua a través de los arcos branquiales) son tan largas que sobresalen de las comisuras de la boca cuando ésta se halla abierta.

Además de la proliferación de branquispinas y de la pérdida de los dientes, el desarrollo de órganos epibranquiales, accesorios, ha sido un tema evolutivo dominante en los peces suspensívoros como los arenques, los sábalos, las sardinas, los menhaden y las alosas. Dichos órganos consisten en un par de bolsas en la parte superior trasera de la faringe, por encima mismo del esófago. Las branquispinas parecen canalizar pequeñas partículas alimenticias hacia estas bolsas, donde aparentemente coalescen en un grumo que, después, el pez se traga. Estos órganos se asocian estrechamente a la ingestion de partículas alimenticias pequeñas.

La ballena franca y la yubarta son los mayores suspensívoros continuos. En estas ballenas, las estructuras filtradoras del interior de la boca presentan una gran resistencia al flujo del agua; la resistencia de presión resultante reduce la velocidad de los animales cuando la boca está abierta. En consecuencia, estas ballenas son incapaces de capturar presas grandes




**3. MANDIBULAS completamente abiertas de los embestidores continuos; les permiten procesar enormes volúmenes de agua a medida que avanzan nadando por regiones ricas en alimento. La espátula (*arriba*) se alimenta principalmente a lo largo de los fondos fluviales fangosos. Aunque su dieta principal es el plancton de agua dulce, la espátula ingiere inadvertidamente pequeños peces suspensívoros. El tiburón peregrino (*abajo*), en cambio, se alimenta en las aguas del mar abierto.**

y evasivas que puedan alejarse nadando de la trayectoria de la boca abierta. En su lugar consumen presas bastante pequeñas y de natación lenta; se ha observado que capturaban copépodos espumando la superficie del agua con la boca abierta.

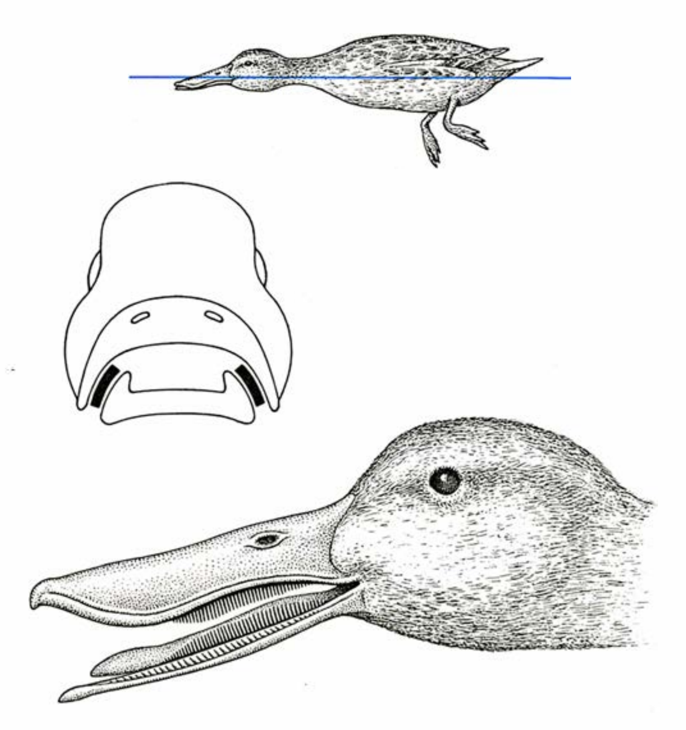
Una característica prominente de los rorcuales, los embestidores intermitentes típicos, es una serie de surcos longitudinales en la región de la garganta. Estos surcos se aplastan y permiten que la piel se expanda cuando la boca se llena de agua. La mandíbula inferior de un rorcual azul puede rotar hacia atrás hasta 90 grados; en cuestión de segundos, la ballena puede engullir 60 metros cúbicos de agua (aproximadamente la mitad de su volumen corporal). El suelo de la boca de la ballena es elástico, y así el animal puede engullir rápidamente un gran volumen de agua; de otro modo, la presión frente a la ballena que nada alejaría alimento y agua de la boca. Los rorcuales no sólo ingieren presas de movimientos relativamente lentos, como krill, sino también cardúmenes de peces y calamares.

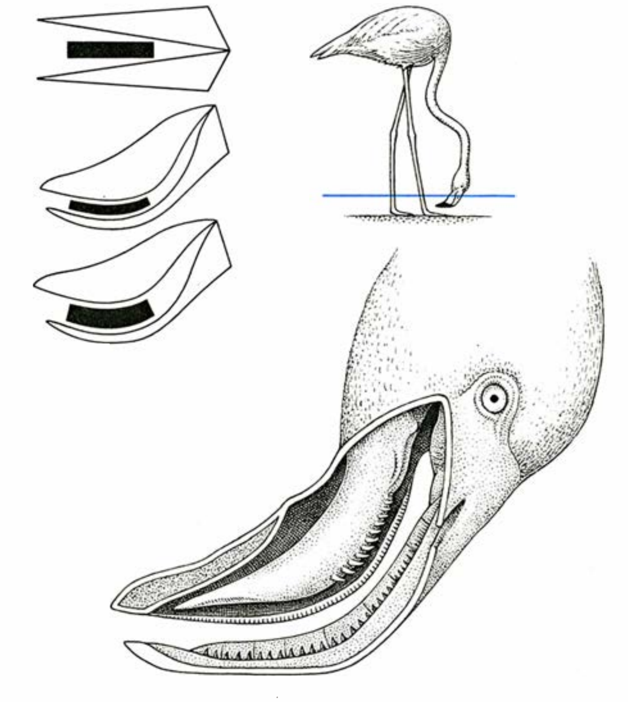
Desde luego, es el gran tamaño y la consiguiente fuerte inercia de la ballena en movimiento lo que hace que este método de alimentación sea posible. Según modelos desarrollados por Lisa S. G. Orton, de la Universidad de Duke, y Paul Brodie, del Instituto de Oceanografía de New Bedford, en Nueva Escocia, la presión sobre el hocico de un rorcual basta, a velocidades de natación normales, para expandir la boca entera una vez ésta ha empezado a abrirse. Los tejidos blandos que rodean la boca se han especializado en oponer poca resistencia a dicha expansión. La lengua, por ejemplo, tiene una hendidura a lo largo de su línea media; bajo el ímpetu del chorro de agua afluente, la hendidura permite que la lengua se pliegue y se inserte en el interior de una hendidura intermuscular en la base de la boca, dejando así espacio para el enorme volumen de agua y presas.

Las mandíbulas de las ballenas deben cerrarse rápidamente alrededor de la bocanada de agua para impedir que las presas se escapen. Las mandíbulas, sus articulaciones y los músculos que las cruzan se han especializado en conseguir ese objetivo. Las quijadas de los rorcuales no están fusionadas en el mentón como las de la mayoría de los demás mamíferos, sino que están conectadas laxamente mediante tejido blando. La articulación temporomandibular entre las mandíbulas inferiores y el cráneo es más libre que la de cualquier otro mamífero; las mandíbulas pueden rotar a lo largo de su eje longitudinal, así como oscilar hacia arriba y hacia abajo, a derecha y a izquierda. En determinada especie, además, un tejido fibrocartilaginoso se extiende por las articulaciones temporomandibulares. Este tejido almacena energía cuando las mandíbulas se abren por el chorro de entrada de agua, y luego libera el agua como un resorte cargado para ayudar a cerrar las mandíbulas.

A diferencia de los embestidores, que abren su boca cuanto pueden para engullir las presas, los suctores continuos tienen una abertura oral reducida. La abertura estrecha de la boca excluye la entrada de partículas grandes (lo que puede revestir especial importancia cuando estos animales comen cerca del fondo, donde hay mucho material no edible que podría obstruir sus sistemas de captación).

Los renacuajos muestran la mayor variación de estructuras alimentarias entre los suctores continuos. Algunos son ramoneadores y tienen un pico agudo con el que desmenuzan y succionan grandes fragmentos de comida, verbigracia, plantas bentónicas. Otros se abastecen de sólo presas microscópicas; viven entre dos aguas y carecen de piezas bucales duras. Ambos tipos de especies emplean esencialmente los mismos mecanismos de

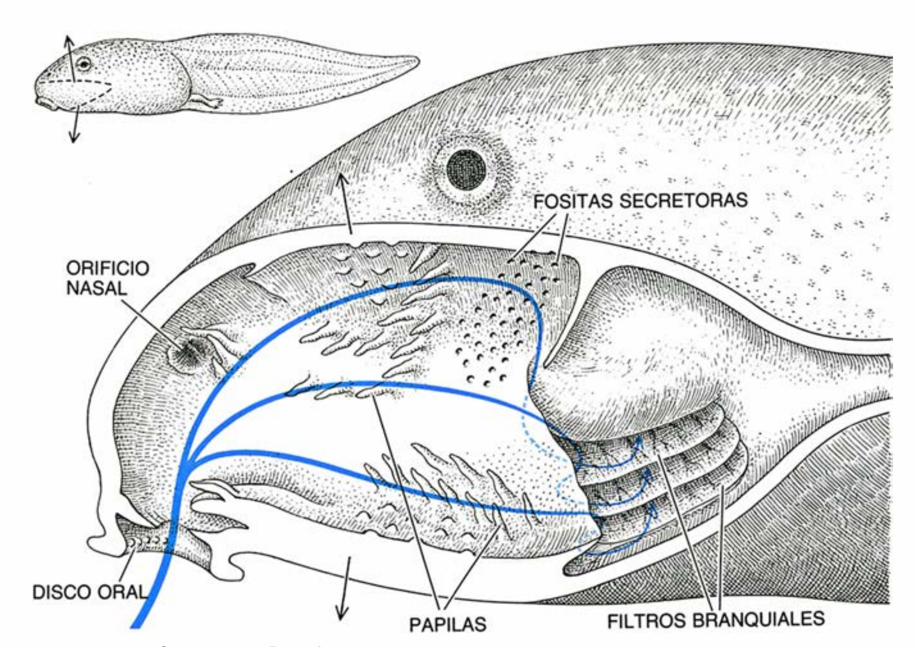




**4. AVES SUSPENSIVORAS; filtran partículas alimenticias del agua mediante las lamelas pectiniformes de los bordes del pico. Tragan agua y luego la expulsan al hacer oscilar rápidamente la lengua hacia delante y hacia atrás. El pato cuchara (*izquierda*) posee lamelas a lo largo de los bordes externos del pico inferior y de los bordes internos del superior. Unos engrosamientos anterior y posterior de la lengua del pato le permiten tragar agua por la parte anterior del pico y expulsarla hacia los lados y hacia atrás por las lamelas; la lengua funciona a modo de pistón y como válvula, a la vez. La lengua del flamenco trabaja como un pistón simple (*derecha*); el ave controla el flujo del agua al abrir y cerrar el pico, en ligera sincronía con el movimiento de la lengua. La fuerte curvatura del pico hace que la distancia entre las mandíbulas superior e inferior, desde el ángulo hasta la punta del pico, sea más uniforme de lo que sería en el caso de un pico recto (*b*). Esta uniformidad persiste con independencia del grado de abertura de las mandíbulas. Los lados del pico del pato (*a*) presentan el mismo efecto debido a la curvatura de las mandíbulas y a la superposición entre éstas.**

transporte de agua y de captación de partículas, pero las especies que se alimentan de plancton microscópico tienen músculos bombeadores menores que las que viven cerca del fondo.

Una vez las partículas alimenticias han penetrado en la boca del renacuajo, filas de papilas de la base y techo de la boca operan a modo de filtros y embudos; apartan directamente las partículas grandes hacia el esófago y desvían las de menor tamaño hacia la faringe. Situados más atrás en la faringe se encuentran los filtros branquiales y las trampas alimentarias branquiales cubiertas de mucus; las partículas alimenticias pequeñas se pegan a las superficies de las trampas y son devueltas a los filtros branquiales mediante un mecanismo que todavía no se conoce bien. El tamaño y porosidad de los filtros branquiales en distintas especies de renacuajos guardan una correlación aproximada con el tamaño de las partículas que ingieren dichas especies; por lo general los renacuajos atrapan, sin embargo, partículas mucho menores que el tamaño de poro de sus filtros. Uno de nosotros (Wassersug) ha sugerido, apoyándose en el estudio de la anatomía, que la intercepción directa de partículas alimenticias en superficies cubiertas de mucus es tan importante como el tamizado.




**5. ELEMENTOS DE LA BRANQUIA de un renacuajo; actúan como filtros en la alimentación. Los músculos del suelo de la boca del renacuajo y los lados de la cabeza bombean agua a través de las branquias. Secreciones de mucus pegajoso en las superficies situadas sobre los filtros branquiales capturan partículas alimenticias conforme van fluyendo por su nivel. Algunos renacuajos disgregan plantas bentónicas e ingieren los fragmentos; otras especies pueden subsistir enteramente con una dieta de partículas mínimas, del tamaño de las bacterias, que son filtradas del agua libre.**

Las aves no poseen ninguna de las estructuras filtrantes que en ballenas, peces y renacuajos captan el alimento. Antes bien, los picos de las aves suspensívoras tienen filas de lamelas, excrecencias queratinizadas que filtran pequeñas partículas del agua. El pico de los ánades reales, por ejemplo, es largo y ancho; cuando la boca está cerrada, el pico superior ancho cubre por completo el pico inferior y la lengua; cuando la boca está ligeramente entreabierta, las láminas adyacentes de los picos superior e inferior actúan de consuno como un tamiz.

La lengua de los patos está también especializada para el suspensivorismo; es ancha, con grandes zonas engrosadas en la parte anterior y posterior. El engrosamiento anterior se aparta del cielo de la boca cuando la lengua se mueve hacia delante, lo que permite que el agua penetre en la boca por su parte frontal; las mandíbulas también se abren ligeramente para succionar agua. Cuando la lengua se retira, el engrosamiento frontal presiona contra el techo bucal, desviando al agua hacia atrás y hacia los lados del pico, a través de las lamelas. El engrosamiento posterior presenta, a ambos lados, raspadores linguales; cuando la lengua se mueve hacia delante y hacia atrás, estas protuberancias arrancan las partículas alimenticias de las lamelas y las envían hacia el esófago. En los ánades reales, la punta de la lengua se mueve hacia delante, unos 11 milímetros; luego, de nuevo hacia atrás cada 60 o 70 milisegundos. Esta rápida oscilación mueve el agua a gran velocidad, de modo que las lamelas pueden capturar partículas alimentarias mediante impacto inercial, amén de por tamizado.

La anatomía oral del flamenco (el ave suspensívora por excelencia) ha desarrollado una adaptación más fina al bombeo del agua y filtrado del alimento. La lengua del flamenco, más estrecha y cilíndrica que la de un pato, se encuentra en una depresión ósea formada en el interior de las profundas mandíbulas inferiores; oscila típicamente de cuatro a 17 veces por segundo cuando el flamenco está comiendo. El pico superior tiene una quilla que desciende hacia la lengua y forma un casquete sobre ella. Este ajustado confinamiento sugiere que la lengua funciona a modo de pistón simple. Existen espinas hacia la parte posterior de la lengua que pueden ayudar a mover las partículas alimenticias hacia el esófago, pero la región de contacto entre la lengua y las múltiples filas de finas lamelas de los picos superior e inferior es mucho menor que la región equivalente de los patos.

Como en los patos, la boca del flamenco se abre y se cierra ligeramente con cada ciclo lingual. Estos sutiles movimientos mandibulares aseguran que el agua fluya a través de la boca en una sola dirección: entra por la parte anterior del pico y sale de las lamelas laterales. Movimientos de las mandíbulas (de abertura, cierre y laterales) pueden modificar notablemente el espacio entre las lamelas, controlando así su resistencia al flujo.

No sabemos todavía de qué modo las lamelas aviares capturan las partículas alimenticias. Hasta hace poco, los investigadores suponían que sólo intervenía el tamizado. Como ocurre en los demás vertebrados suspensívoros, existe una relación general entre la finura, densidad y número de filtros y el tamaño típico de las partículas ingeridas.

Sin embargo, la correlación no es absoluta; la dieta de algunos patos no puede predecirse a partir de la morfología de sus lamelas. Jan G. M. Kooloos, Gart A. Zweers y sus colegas, de la Universidad de Leiden, han demostrado que los patos ajustan continuamente la porosidad de su mecanismo de filtración al tamaño de las partículas alimenticias disponibles; alteran, para ello, su abertura y elevan el pico superior. Además, algunos patos, como los ánades reales y los porrones moñudos, pueden comer sin problemas aunque sus lamelas hayan quedado bastante dañadas. Tienen que operar otros mecanismos, amén del simple tamizado, aunque su conocimiento cabal exige ulteriores estudios.

En muchos aspectos, los vertebrados suspensívoros constituyen una caja negra: las partículas alimenticias penetran en su boca, pero ya no vuelven a salir. Se han identificado muchos elementos anatómicos de la alimentación suspensívora, pero la hidrodinámica implicada todavía no se conoce bien. También queda que investigar la musculatura básica de la lengua y de la faringe de muchos suspensívoros; los contenidos estomacales de muchas ballenas han sido objeto de estudio, pero no puede decirse lo mismo de los músculos craneales que ayudan a introducir el alimento en el estómago.

A pesar de todo, se ha avanzado. Uno de los autores (Sanderson), junto con Joseph J. Cech, Jr., de la Universidad de California en Davis, conseguimos recientemente colocar un endoscopio en el interior de la boca de un pez suspensívoro que nadaba libremente, y observar la interacción entre partículas alimenticias y elementos filtrantes. También insertamos una sonda para registrar la velocidad del agua. Los análisis preliminares indican que las pautas del flujo del agua no se corresponden con los mecanismos que se predecían para la captura de partículas. Habrá que realizar otros experimentos para determinar si estos resultados se pueden generalizar a otros vertebrados suspensívoros. Se están aplicando nuevos enfoques para analizar los mecanismos de suspensivorismo, que van desde las películas de rayos X de alta velocidad hasta los modelos de supercomputador del flujo de fluidos a través de la boca de los peces; alguno de estos enfoques dará su fruto a poco que le acompañe la fortuna.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA


A COMPARATIVE STUDY OF THE BUCCAL PUMPING MECHANISM OF TADPOLES. Richard J. Wassersug y Karin Hoff en *Biological Journal of the Linnean Society*, vol. 12, págs. 225-259; noviembre de 1979.

THE SUSPENSION FEEDING MECHANISM OF THE LARVAL LAMPREY *PETROMYZON MARINUS*. Jon Mallat en *Journal of Zoology, London*, vol. 194, Parte 1, págs. 103-142, mayo de 1981.

A REVIEW OF PLANKTIVOROUS FISHES: THEIR EVOLUTION, FEEDING BEHAVIOURS, SELECTIVITIES, AND IMPACTS. Xavier Lazzaro en *Hydrobiologia*, vol. 146, págs. 97-167; 1987.

COMPARATIVE MECHANICS OF FILTER-FEEDING OF *ANAS PLATYRHYNCHOS, ANAS CLYPEATA* AND *AYTHYA FULIGULA* (AVES, ANSERIFORMES). J. G. M. Kooloos, A. R. Kraaijeveld, G. E. J. Langenbach y G. A. Zweers en *Zoomorphology*, en prensa.

# Biodegradación e ingeniería genética

*Las bacterias degradan una amplia variedad de compuestos orgánicos. La manipulación genética de sus rutas catabólicas es una vía eficaz para acelerar su evolución y permitir la mineralización de compuestos tóxicos*

Juan Luis Ramos y Fernando Rojo

La degradación, o catabolismo, de compuestos orgánicos por las bacterias ha llamado la atención de numerosos microbiólogos, bioquímicos y genéticos de este siglo. El enfoque y el punto de interés han variado con la naturaleza de la propia disciplina, pero en conjunto han contribuido a desentrañar las bases moleculares del metabolismo bacteriano.

Es difícil exagerar la importancia de la versatilidad metabólica bacteriana y de las leyes que regulan su funcionamiento. Las bacterias son organismos que gozan de una enorme plasticidad bioquímica, se adaptan con facilidad a cambios ambientales y son muy tolerantes a situaciones extremas en el medio donde habitan. Esos microorganismos constituyen, además, un sistema ideal para el desarrollo de modelos biológicos que no encuentra parangón en otros sistemas vivos. Los cambios evolutivos que se producen en las bacterias ocurren de manera constante, y, debido a que se multiplican rápidamente, permiten el estudio de esos cambios, su control y su imitación en el laboratorio.

JUAN LUIS RAMOS y FERNANDO ROJO comenzaron a trabajar juntos en manipulación, caracterización molecular y ensamblaje de rutas catabólicas de la bacteria *Pseudomonas* en el laboratorio de Kenneth Timmis, de la Universidad de Ginebra, en 1985. Ramos se doctoró en ciencias biológicas en 1981 por la Universidad de Sevilla. Pasó luego dos años, becado por la Organización Europea de Biología Molecular, en la Unidad de Fijación del Nitrógeno en Brighton. Desde 1987 prosigue su labor de investigación en la Estación Experimental del Zaidín, sobre manipulación genética de rutas catabólicas. Rojo, que se doctoró en ciencias por la Universidad Autónoma de Madrid en 1985, trabaja hoy en la regulación de la transcripción bacteriana en el Centro de Biología Molecular del CSIC en Madrid.

Nos ocuparemos aquí de las actividades bioquímicas a través de las cuales las bacterias degradan una amplia gama de compuestos aromáticos naturales o sintetizados por la industria y prestaremos especial atención a la evolución en el laboratorio de rutas catabólicas para la eliminación de compuestos aromáticos que contaminan el ambiente. Por compuestos aromáticos deben entenderse aquellas moléculas orgánicas con una estructura básica formada por un anillo de seis carbonos con una configuración electrónica que les confiere gran estabilidad. Ejemplos de compuestos aromáticos son el tolueno, el ácido benzoico, el benceno, etcétera. En la actualidad se sintetizan grandes cantidades de derivados clorados de estos compuestos.

El interés por la estructura y las propiedades de tales compuestos no es reciente. En 1761, John Hill, controvertido médico inglés, publicó un artículo en el que llamaba la atención sobre el uso inmoderado del tabaco y sus efectos perjudiciales en la salud. Cincuenta años más tarde, se aislarían benzopirenos del alquitrán del tabaco. En los años treinta del presente siglo, E. L. Kenneaway e I. Heiger, de la Universidad de Oxford, establecieron que otros compuestos aromáticos, los dibenzoantracenos, provocaban cáncer de piel. En las últimas décadas hemos asistido a un auténtico alud de informaciones que ponían en relación algunos tumores con determinados compuestos orgánicos.

Las bacterias han colonizado todos los medios. Las del suelo y del agua presentan un enorme abanico de capacidades catabólicas que les permiten metabolizar una gran variedad de compuestos orgánicos naturales y sintéticos. Según D. Gibson, de la Universidad de Texas, los pioneros de estos estudios a principios de siglo fueron K. Stormer y N. L. Söhngen, quienes aislaron bacterias que utilizaban tolueno y benceno como única fuente de carbono y energía. Estudios posteriores establecieron que la capacidad de los microorganismos del suelo para degradar compuestos aromáticos se distribuía de manera ubicua. Nosotros mismos hemos aislado en la provincia de Granada bacterias que crecen a expensas de contaminantes ubicuos, como son algunos alquilbencenos, moléculas cuya estructura se caracteriza por presentar un anillo aromático con una cadena lateral de uno o más carbonos.

Aunque muchos investigadores se han mostrado escépticos ante la posibilidad de que las bacterias y otros microorganismos del suelo crezcan a expensas de hidrocarburos como única fuente de energía, esa capacidad nos parece plenamente comprobada: a lo largo de miles de años, los microorganismos se han visto expuestos a compuestos aromáticos naturales que se han formado por pirólisis de compuestos orgánicos naturales, por ejemplo en los incendios forestales. El tipo de aromático que se forme dependerá de la temperatura de pirólisis; así, a temperaturas elevadas (2000 grados Celsius) se producen, preferentemente, hidrocarburos policíclicos no sustituidos; a temperaturas intermedias (800 grados C), hidrocarburos con sustituciones alquílicas, y, a bajas temperaturas (150 grados C), los petróleos.

Los descubrimientos en el campo de la química orgánica registrados a finales del siglo pasado llamaron la

atención sobre los mecanismos que utilizan los seres vivos en la asimilación de compuestos orgánicos. Así, el establecimiento en 1865 por Friedrich A. Kekulé, de la Universidad de Heidelberg, de la estabilización por resonancia del anillo bencénico despertó el interés por descubrir los sistemas que empleaban los seres vivos para salvar la energía de activación necesaria para romper el anillo aromático y generar estructuras carbonadas asimilables.

Pero el esclarecimiento de esos mecanismos hubo de esperar hasta los años sesenta y setenta de nuestro siglo, cuando Stanley Dagley, de la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign, David Gibson, de la de Texas en Austin, y otros investigadores llegaron a la conclusión de que la estrategia seguida por los microorganismos consistía en desestabilizar el anillo aromático mediante la introducción de dos grupos hidroxilo. Así, el compuesto pasa a ser susceptible de ataque enzimático para rendir formas asimilables del carbono.

Para entender los mecanismos de la degradación microbiana de compuestos aromáticos es importante conocer cómo se regula la expresión de las actividades enzimáticas implicadas en el proceso. Roger Stanier y sus colaboradores, de la Universidad de California en Berkeley, demostraron, a finales de los cuarenta, que las enzimas responsables de la degradación de ciertos aromáticos se sintentizaban en respuesta a la presencia de tales sustancias en los medios de cultivo. El conocimiento de la bioquímica de una ruta catabólica, de las enzimas que intervienen y de la organización de los genes que determinan tales enzimas es imprescindible para entender la evolución seguida por las rutas e intentar su manipulación *in vitro*.

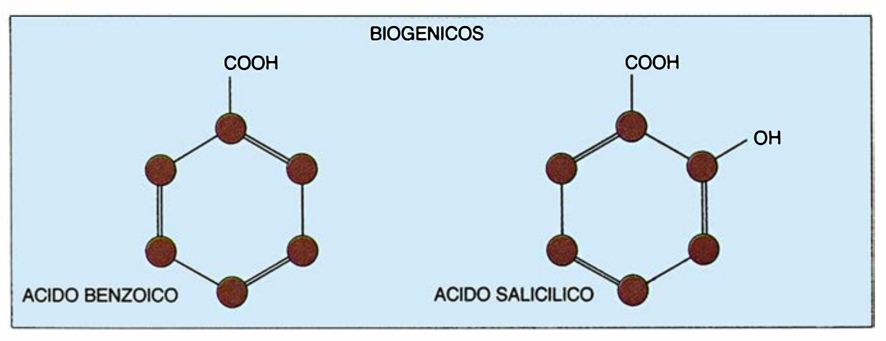
Conviene, sin embargo, dejar claros de antemano algunos conceptos habituales en el dominio de la degradación biológica. En particular, las nociones de compuestos biogénicos y xenobióticos, por un lado, y, por otro, las de mineralización, biotransformación y recalcitrancia de un compuesto. Los productos biogénicos, por ejemplo los ácidos benzoico y salicílico, son compuestos de síntesis industrial cuya estructura es igual o similar a los sintetizados por los seres vivos en alguna fase de su metabolismo; los xenobióticos se caracterizan por presentar estructuras o sustituyentes que raramente se encuentran en los naturales, como por ejemplo clorofenoles y dioxinas.

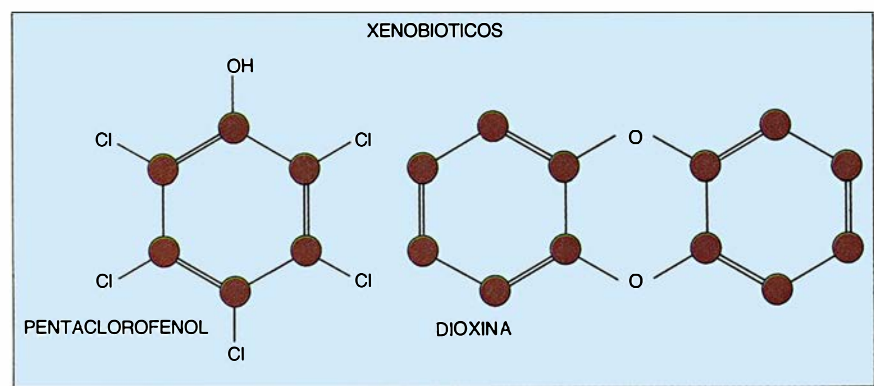
Los compuestos biogénicos son, en general, mineralizables; es decir, se convierten en $CO_2$, agua y formas inorgánicas por la acción de los seres vivos, predominantemente por los microorganismos y como parte del constante reciclaje de los átomos de carbono. La mineralización de un compuesto implica su alteración estructural y la formación de intermediarios metabólicos que pueden servir de elementos estructurales de la célula o de combustible al oxidarse. Los intermediarios pueden convertirse en distintos compuestos orgánicos antes de su combustión final. En el proceso de transformación de un compuesto en otro, puede sufrir la pérdida de uno o más de sus elementos estructurales o sólo una mera reordenación de sus átomos.

El término biodegradación no indica la extensión en la que se ha alterado una molécula; tampoco señala si en el proceso se genera energía. Quizá resulte más apropiado hablar de biotransformación para referirse al proceso a través del cual un ser vivo modifica un compuesto sin llegar a mineralizarlo. Ahora bien, mientras que la mineralización de un compuesto orgánico es un hecho central y crítico para el mantenimiento de la vida de este planeta, la transformación parcial de un compuesto no tiene necesariamente un fin beneficioso: amén de poder formarse productos no mineralizables, en algunos casos el producto resultante puede ser incluso más tóxico y perjudicial que la sustancia de partida.

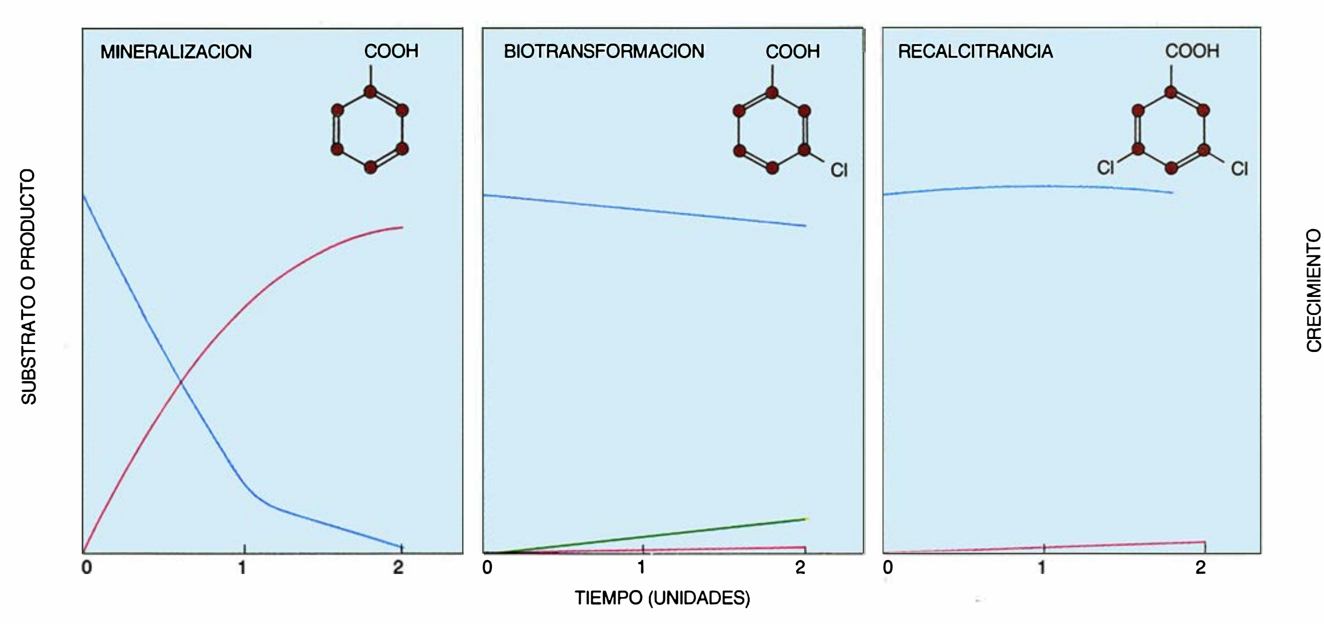
Ocurre también que no todos los compuestos orgánicos de la biosfera son susceptibles de ataque biológico. Porque persisten en el ambiente incólumes se dice que son recalcitrantes. Desde el punto de vista termodinámico, y en las condiciones actuales de la tierra, todos los compuestos orgánicos son inestables y tienden a su forma más estable, que es el anhídrido carbónico ($CO_2$) en situación aerobia o el metano ($CH_4$) en un ambiente anaerobio, o carente de oxígeno. Un aspecto importante en la lucha contra la contaminación química es el de entender la razón o razones por las que un compuesto es recalcitrante. Estas pueden ser muchas y diversas; entre ellas, que el compuesto sea tóxico para los microorganismos, que presente estructuras químicas muy estables y resistentes al ataque biológico o que posea elementos estructurales que raramente se encuentran en la naturaleza. En general, la resistencia de un compuesto aromático al ataque por los seres vivos aumenta con el número de sustituyentes que tenga, cualquiera que sea su naturaleza química.

Conviene señalar que, aunque en muchos casos un solo organismo es




**1. COMPUESTOS AROMATICOS biogénicos y xenobióticos resultantes de la actividad humana. Cada año se sintetizan miles de productos orgánicos, muchos de ellos aromáticos. Algunos se utilizan en la industria, y, entre éstos, sólo unos pocos se producen en grandes cantidades. Llámanse productos biogénicos aquellos cuya estructura es similar a los sintetizados por los seres vivos; xenobióticos, los que presentan estructuras o sustituyentes que raramente se dan en la naturaleza.**




**2. MINERALIZACION, biotransformación y recalcitrancia de compuestos aromáticos. La mineralización consiste en la conversión de un compuesto en $CO_2$, $H_2O$ y formas inorgánicas. Si un microorganismo, o una comunidad microbiana, posee una ruta catabólica para la mineralización de un compuesto, la concentración de éste (*línea azul*) disminuirá con el tiempo e incrementará la masa microbiana (*izquierda, línea roja*). Por el proceso de transformación se entiende la conversión de un compuesto en otro sin ser mineralizado; el compuesto biotransformado desaparecerá con el tiempo y surgirán uno o varios productos (*línea verde, centro*). La recalcitrancia indica que un compuesto es resistente al ataque por los seres vivos; los productos recalcitrantes no son metabolizados en ninguna extensión y, por consiguiente, no permiten el crecimiento celular (*derecha*).**

capaz de mineralizar un compuesto dado, en otros casos participan en el proceso varios organismos. Estos consorcios que actúan en la naturaleza pueden aislarse en el laboratorio y mantenerse de manera estable en cultivos continuos. Algunos microorganismos están capacitados para transformar un compuesto cuando utilizan como fuente de carbono y energía otro compuesto diferente.

Nos centraremos aquí en los aspectos críticos de la degradación de aromáticos. Esta ocurre en dos fases; la primera consiste en la activación del anillo mediante la introducción de dos grupos hidroxilo; la segunda, en la fisión o ruptura del anillo activado. El ejemplo más sencillo de activación del anillo aromático lo constituye la oxidación del benceno por la benceno oxigenasa para producir un dihidrodiol, que posteriormente se oxida a catecol; este último compuesto es la verdadera forma activada del anillo.

Un mismo compuesto puede sufrir distintos tipos de ataque que conduzcan a la forma activada. Por ejemplo, el tolueno se puede degradar a través de dos vías: mediante el ataque contra el anillo aromático, que es oxidado por la tolueno oxigenasa que forma 3-metilcatecol, y mediante el ataque contra la cadena alquílica lateral ($-CH_3$), que se oxida secuencialmente a su alcohol ($-CH_2O$), aldehído ($-CHO$) y ácido carboxílico ($-COOH$) correspondiente. El ácido benzoico resultante es descarboxilado y oxigenado para producir el catecol. En algunos casos, los compuestos naturales presentan ya un grupo hidroxilo en su molécula. Acontece eso con el fenol, el cual se oxida a catecol por acción de una fenol hidroxilasa. En algunas ocasiones, los anillos aromáticos se encuentran sustituidos con grupos metoxi ($-OCH_3$), átomos de cloro, etcétera. A veces, la activación del anillo implica la eliminación del sustituyente y la introducción de dos grupos hidroxilo.

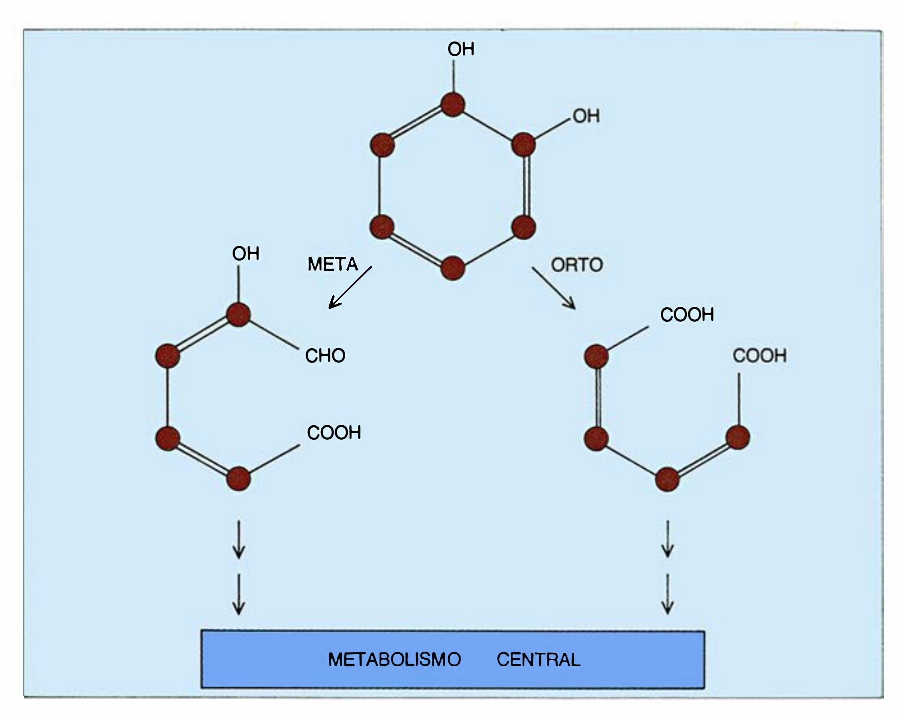
En estos casos, la preparación del anillo para su rotura no sólo implica su activación, es decir, su desestabilización química, sino también la eliminación de la sustitución. Por ejemplo, en el caso de 4-metoxibenzoato, uno de los muchos compuestos que se forman en el metabolismo de ligninas, existe una enzima, la demetilasa hidroxilante del 4-metoxibenzoato, que separa el grupo metoxi e introduce un grupo hidroxilo; el 4-hidroxibenzoato resultante se hidroxila para producir 3,4-dihidroxibenzoato.

Uno de los aspectos más interesantes del metabolismo de los aromáticos nos lo ofrece la fisión del anillo aromático, una vez que lleva incorporados los dos sustituyentes hidroxilo. La rotura del anillo está siempre catalizada por una dioxigenasa; se denomina fisión orto (también, fisión intradiol), cuando ocurre entre los carbonos 1 y 2 del anillo aromático, y fisión meta (fisión extradiol), si se produce entre los carbonos dos y tres del anillo aromático. Los productos que se forman tras la fisión del anillo se transforman luego, a través de varios pasos, en compuestos que entran en el metabolismo central de la bacteria (ciclo de Krebs).

En general, podemos afirmar que los aromáticos que contienen sustituyentes del tipo alquílico se metabolizan a través de rutas meta, mientras que los aromáticos no sustituidos o con sustituyentes del tipo halogenado, por ejemplo cloro o bromo, se metabolizan a través de rutas orto, rutas que se llaman así en razón del tipo de rotura que sufre el anillo. La existencia de esas dos clases de fisión del anillo aromático se debe a dos factores: la especificidad de los reguladores de la ruta por sus efectores y la especificidad de las enzimas por sus correspondientes sustratos. No existe ninguna dioxigenasa que pueda atacar todos los posibles sustratos derivados del catecol. La separación de las rutas catabólicas constituye la base de la técnica de adaptación simultánea que fue descubierta, ya en 1947, por Stanier en la Universidad de California.

La genética de la degradación de compuestos aromáticos por microorganismos adquirió especial interés después del año 1970, cuando en el laboratorio de I. C. Gunsalus, de la Universidad de Illinois en Urbana Champaign, se observó que la capacidad de algunas bacterias gram-ne-

gativas del género *Pseudomonas* para degradar compuestos exóticos (naftaleno, salicilato y alcanos de cadena de 6 a 10 carbonos), no sólo se perdía espontáneamente, sino que dicha capacidad era, además, transmisible por conjugación entre distintas cepas bacterianas. Ello sugería que la información genética que determinaba estas funciones metabólicas estaba asociada a plásmidos transmisibles, lo cual se corroboró posteriormente al aislar dichos plásmidos. (Llámanse plásmidos ciertos elementos genéticos extracromosómicos que se replican de manera autónoma; codifican, en las bacterias, otras muchas funciones, por ejemplo, la resistencia a los antibióticos y a los metales pesados, la patogenicidad para animales y plantas, la síntesis de antibióticos, etcétera. Una propiedad compartida por todos los plásmidos consiste en que las funciones que determinan no son absolutamente necesarias para la célula, si bien su presencia les confiere, a éstas, ventajas adicionales en el crecimiento y la supervivencia.)

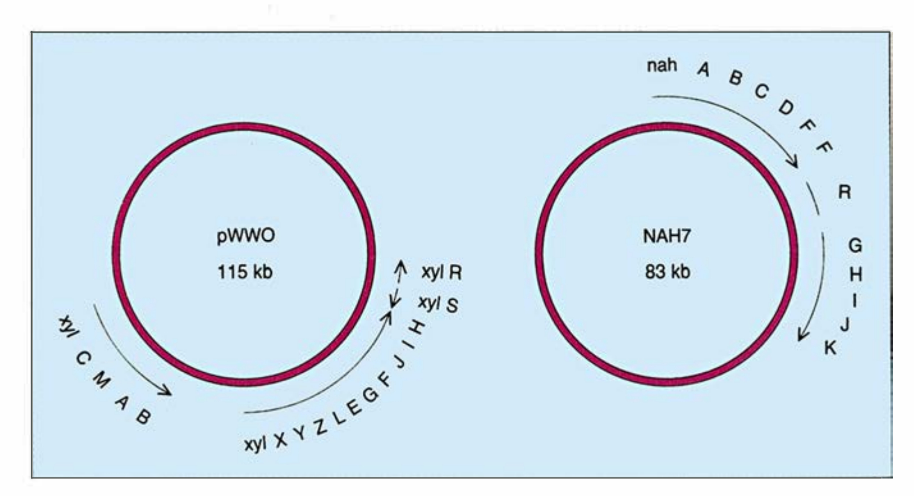



**3. ROTURA DEL ANILLO AROMATICO DEL CATECOL.** El anillo se rompe por acción de las enzimas catecol dioxigenasas, que existen en dos tipos: uno que rompe el anillo entre los carbonos 1 y 2 (posición orto) y otro que lo rompe entre los carbonos 2 y 3 (posición meta). Los productos resultantes en ambos casos son, a su vez, transformados por otras enzimas en compuestos que entran en el metabolismo central de la bacteria (ciclo de Krebs). Aunque las reacciones se muestran solamente para el catecol, suceden de forma análoga con catecoles sustituidos en cualquier posición.

Durante las dos últimas décadas han ido saliendo a la luz múltiples funciones catabólicas contra compuestos xenobióticos que están determinadas por plásmidos. Podríamos citar, a este respecto, la degradación del herbicida 2,4-diclorofenoxiacético (conocido por 2,4-D) y la eliminación de solventes orgánicos, como el tolueno y los xilenos, y detergentes, como los sulfonatos de los alquilbencenos. En algunas ocasiones, las funciones catabólicas no sólo implican a genes plasmídicos, sino que involucran también a genes cromosómicos. Este es el caso de la ruta de la degradación de 3-clorobenzoato de una bacteria del género *Pseudomonas*, aislada por el grupo de Hans-Joachim Knackmuss, de la Universidad de Göttingen, quien ha puesto de manifiesto que las funciones plasmídicas relacionadas con la ruta se limitan a la de los genes específicos de dicha vía, mientras que otras enzimas vienen codificadas por genes cromosómicos. Además, se ha de tener en cuenta que ciertas rutas catabólicas, como las de la degradación de benzoato e hidrobenzoatos, son de codificación cromosómica en la mayoría de los organismos.

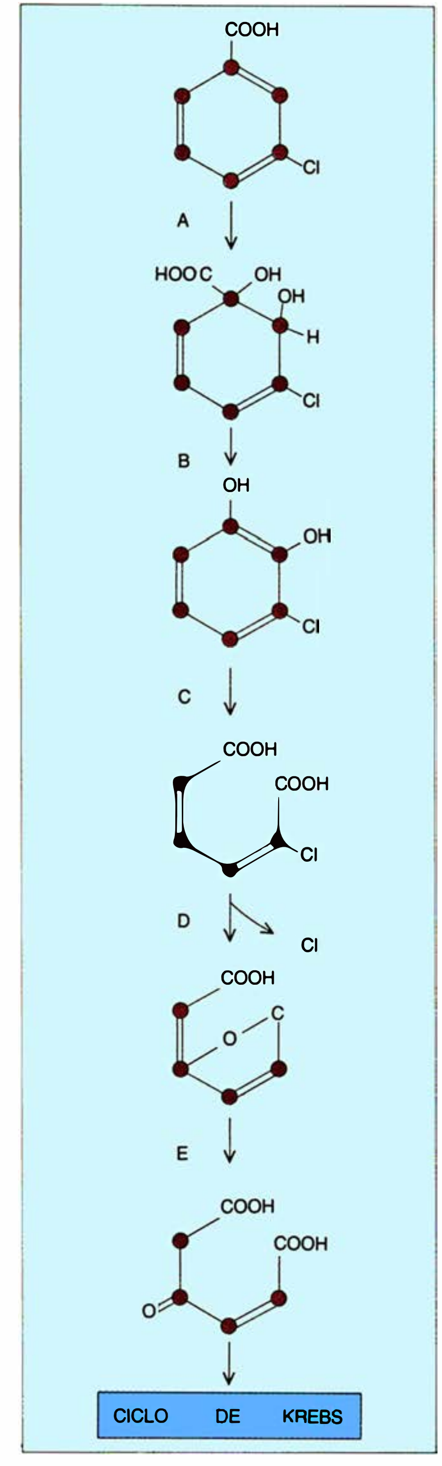
Se han estudiado con bastante detalle varios de los plásmidos implicados en rutas catabólicas. Los mejor caracterizados, en cuanto a su organización estructural, quizá sean los plásmidos TOL y NAH7 de *Pseudomonas*. En el desciframiento de la estructura y función de las rutas catabólicas de degradación de tolueno por el plásmido TOL *p*WWO han intervenido de manera destacada tres grupos de investigadores: el encabezado por P. Williams, de la Universidad de Bangor, pionero en la caracterización molecular de TOL, el dirigido por Teruko Nakazawa, de la Universidad de Ube en Japón, y el de Kenneth Timmis, primero en el Instituto Max Planck de Berlín y luego en la Universidad de Ginebra.

El plásmido TOL contiene los genes que determinan las enzimas implicadas en la degradación de tolueno, vía benzoato y catecol, para dar intermediarios del ciclo de Krebs. Los genes de esta ruta, así como los de muchas otras rutas catabólicas, se agrupan formando operones, lo cual facilita su regulación. (Un operón es un conjunto de genes que se expresan desde el mismo punto genético y que, por tanto, comparten el mismo siste-




**4. MAPA FISICO** de los plásmidos catabólicos *p*WWO y NAH7. Los genes *xyl*CMABN y *xyl*XYZ...H del plásmido *p*WWO son los genes estructurales que determinan las enzimas de la ruta de degradación del tolueno y xileno, mientras que *xyl*R y *xyl*S son genes reguladores. En el plásmido NAH7, el gen *nah*R determina el regulador de la ruta, proteína que es responsable de la expresión de los genes estructurales *nah*A...F y *nah*G...K, los cuales determinan las enzimas para asimilar naftaleno.

ma de regulación.) En el caso de la degradación de tolueno determinada por TOL, los genes reguladores de las funciones catabólicas están codificados por el mismo plásmido TOL. Esto nos lleva a considerar uno de los principales aspectos de la manipulación de las rutas catabólicas: la regulación de los genes que determinan enzimas catabólicas.




**5. RUTA DE MINERALIZACION de clorobenzoato por *Pseudomonas* B13. Las enzimas de la ruta son: *A*, benzoato 1,2-dioxigenasa; *B*, dihidroxiciclohexadieno carboxilato deshidrogenasa; *C*, catecol 1,2-dioxigenasa; *D*, cloromuconato cicloisomerasa; y *E*, dienol-lactona hidrolasa.**

En general, las rutas catabólicas están reguladas. Esto significa que sólo se expresan en ciertas condiciones. La regulación suele ser, además, de tipo positivo; es decir, los genes se expresan o activan en respuesta a la presencia del sustrato a degradar o de intermediarios de la ruta. En el mecanismo habitual interviene una molécula reguladora que se halla en las células, por lo común, a baja concentración. Se acepta que este regulador se da en una configuración doble: activa e inactiva; en la conformación inactiva, no induce la expresión de los genes de la ruta; la forma activa sí es capaz de provocar su expresión. Las moléculas efectoras, aquellas que activan al regulador inactivo, pueden ser los primeros sustratos de la ruta, intermediarios de ésta o ambos. En el caso particular de la regulación de la ruta de degradación de tolueno del plásmido TOL de *Pseudomonas putida*, una de las proteínas reguladoras, XylR, se encuentra en la célula a baja concentración; cuando se aporta al medio sustratos de la ruta (tolueno o xilenos), éstos entran en el interior de la célula e interaccionan con XylR, activando la proteína reguladora. El complejo de XylR con el hidrocarburo estimula la transcripción desde los promotores del plásmido TOL implicados en la expresión de los genes de la ruta de degradación de tolueno.

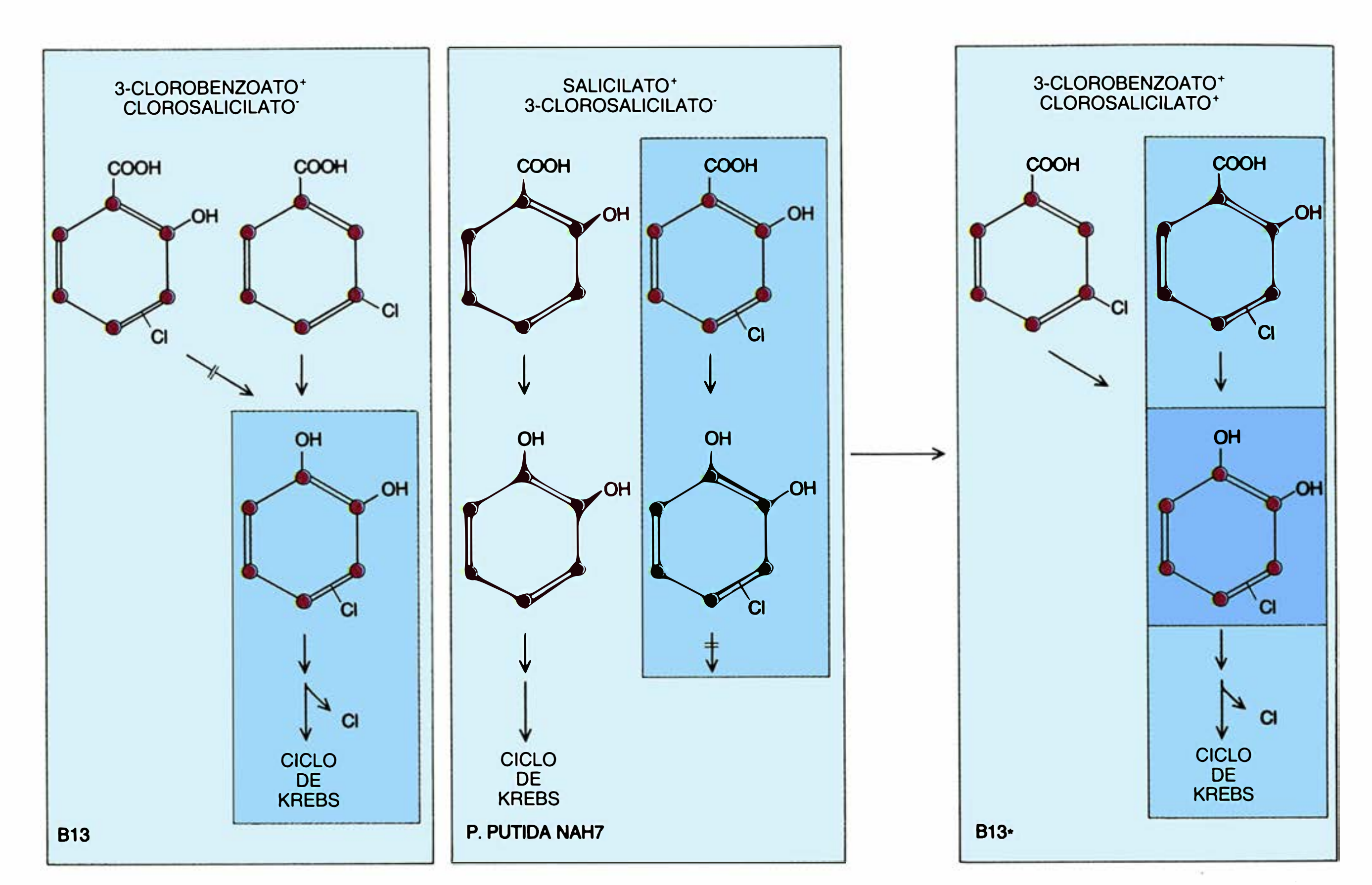
Pero no siempre los inductores de la ruta son los sustratos de ésta; a veces, los intermediarios metabólicos son los responsables de tal inducción. Eso ocurre con la ruta de degradación de clorobenzoatos de *Pseudomonas* B13, en la que el inductor de la misma es el ácido cloromucónico, un metabolito derivado del clorobenzoato; los genes de esta ruta se expresan de forma continua, en ausencia incluso del sustrato a degradar, aunque a muy bajo nivel. Las bajas concentraciones de las enzimas que se producen son, sin embargo, suficientes para permitir que, cuando el sustrato entre en la célula, sea transformado en el intermediario correspondiente de forma que éste, a su vez, activa al regulador, que induce entonces altos niveles de expresión de las enzimas de la vía. En una situación intermedia se encuentra la ruta de degradación del nalftaleno codificada por el plásmido NAH7, la cual se activa por un regulador que reconoce tanto al primer sustrato de la ruta, el naftaleno, como a un metabolito intermediario de la misma, el ácido salicílico.

En muchas bacterias, la presencia de ciertas fuentes de carbono inhibe la utilización de otras fuentes menos ricas. Así, mientras la enterobacteria *Escherichia coli* cataboliza o descompone el azúcar glucosa, no consume o lo hace a muy baja tasa otros azúcares, como por ejemplo la lactosa. Ese fenómeno de represión catabólica no suele darse en las rutas de degradación de aromáticos tóxicos. Más aún, nuestra experiencia nos indica que no sólo no se da esa inhibición o represión, sino que la bacteria, en presencia de dos fuentes de carbono asimilables, así un azúcar (glucosa) y un hidrocarburo (tolueno), crece más deprisa que con una sola fuente de carbono en el medio; prueba de que las dos fuentes de carbono se están metabolizando simultáneamente.

Hasta el momento hemos analizado los elementos que componen una ruta catabólica, que podríamos resumir en tres: las enzimas de la ruta que llevan a cabo las reacciones de transformación de un producto en otro, los genes estructurales que determinan esas enzimas y los genes reguladores que determinan las proteínas que controlan la expresión de los genes estructurales. Cuanto mayor sea el conocimiento de cada uno de esos elementos de la ruta que queramos manipular, mayores serán también las posibilidades de éxito.

El objetivo central de la manipulación en el laboratorio de los elementos de las rutas catabólicas es el de ampliar el número de compuestos que pueden metabolizarse a través de las mismas, poniendo especial énfasis en la eliminación de tóxicos recalcitrantes. Se distinguen tres formas fundamentales de expansión de rutas catabólicas: expansión horizontal, expansión vertical y ensamblaje de rutas. Con la primera se pretende aumentar el número de sustratos metabolizados por una ruta para incluir análogos estructurales de los mismos. Esta expansión horizontal se consigue a través de mutaciones que aumentan el número de sustratos o de efectores que una enzima o un regulador transforma o reconoce. Otra forma de lograr ese mismo propósito es mediante la incorporación de enzimas isofuncionales que permiten ampliar el espectro de análogos que se metabolizan a través de la ruta en cuestión.

Hablamos de expansión vertical cuando nos referimos a la adición de elementos a una ruta básica preexistente, de forma que el organismo adquiere entonces capacidad para degradar nuevos compuestos. Las situaciones más complejas en el diseño y




**6. EXPANSION VERTICAL de la ruta de degradación de clorocatecoles de *Pseudomonas* B13. Esta bacteria crece en 3-clorobenzoato vía 3-clorocatecol, pero es incapaz de hacerlo en clorosalicilatos porque carece de la enzima salicilato hidroxilasa, que convierte los clorosalicilatos en clorocatecoles (*izquierda*). *Pseudomonas putida*, cuando porta el plásmido NAH7, crece en salicilato, pero es incapaz de hacerlo en clorosalicilatos porque carece de la maquinaria enzimática para degradar clorocatecoles (*centro*). Los genes *nah*G y *nah*R del plásmido NAH7 de *Pseudomonas putida*, que determinan, respectivamente, una salicilato hidroxilasa, que convierte clorosalicilatos en clorocatecoles, y su regulador positivo, se clonaron en un vector muy versátil y se transfirieron a B13. La nueva bacteria B13* (*a la derecha*) es capaz de crecer en 3-clorobenzoato y en clorosalicilatos.**

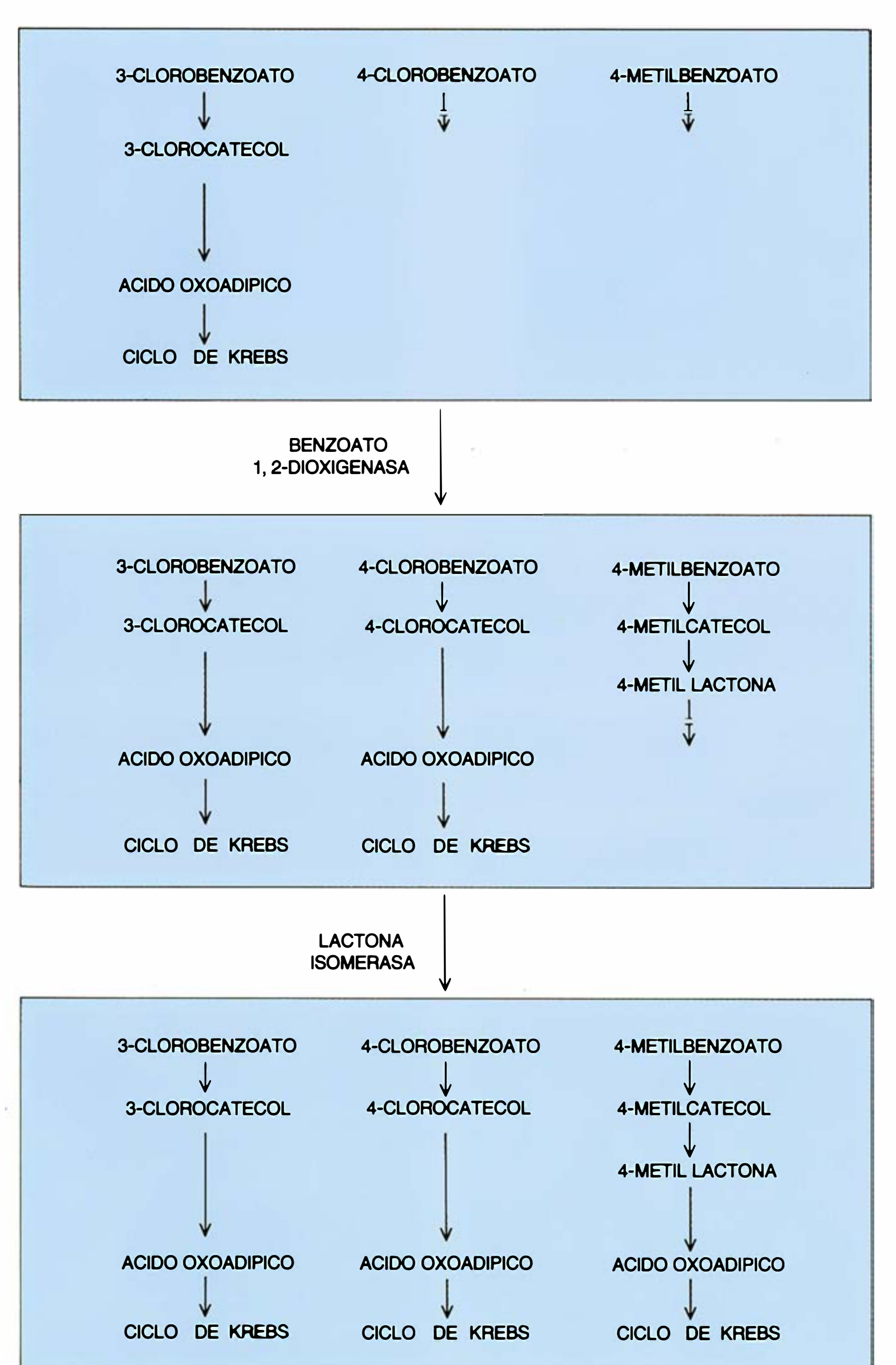
reestructuración de rutas catabólicas en el laboratorio se dan cuando no existe una ruta que pueda ampliarse de forma vertical u horizontal para la degradación de cierto compuesto. En esos casos, se impone construir nuevas rutas mediante el ensamblaje de elementos de rutas existentes.

Esas manipulaciones se llevan a cabo con las técnicas de la genética clásica y de la ingeniería genética, es decir, clonaje de genes, mutagénesis in vivo e in vitro y otras. La bacteria *Pseudomonas* B13 constituye un buen ejemplo para analizar esos tres tipos de manipulación, ya que su ruta de degradación de 3-clorobenzoato se ha podido expandir horizontal y verticalmente. Asimismo, la introducción en esa bacteria de varios segmentos de rutas catabólicas, que al ensamblarse forman una ruta nueva, ha permitido el metabolismo simultáneo de metil- y clorobenzoatos, procesos que, por razones complejas, son en principio incompatibles entre sí. *Pseudomonas* B13 fue aislada por Knackmuss y colaboradores en la Universidad de Göttingen. El grupo realizó un detenido estudio químico y bioquímico, merced al cual quedó establecida la secuencia de pasos que conducen a la mineralización del 3-clorobenzoato.

Tres de las enzimas de la ruta son críticas para el metabolismo de los intermediarios halogenados: catecol 1,2-dioxigenasa, lactona isomerasa y dienelactona hidrolasa. El interés por la expansión de la ruta para 3-clorobenzoato surgió de la observación de que esa bacteria no podía crecer a expensas del análogo 4-clorobenzoato. El trabajo de Walter Reineke, en el laboratorio de Knackmuss, estableció que el paso limitante para ello lo constituía la primera enzima de la ruta, una benzoato dioxigenasa que no aceptaba al 4-clorobenzoato como sustrato. Sin embargo, el plásmido TOL de *Pseudomonas* determina una benzoato dioxigenasa que ejerce su acción enzimática en sustratos muy diversos y es capaz de oxigenar benzoato, metilbenzoatos y 3- y 4-clorobenzoato. A pesar de ello, *P. putida*, cuando porta el plásmido TOL, no puede crecer a expensas de los análogos clorados porque no posee la maquinaria para deshalogenar los intermediarios clorados que se forman y que constituyen productos suicidas de los que la célula no puede obtener energía ni esqueletos carbonados. Por contra, la incorporación en *Pseudomonas* B13 de los genes *xyl*XYZ de TOL, que codifican la benzoato dioxigenasa de amplio espectro de sustratos, junto con su gen regulador *xyl*S, sí posibilitó que la bacteria transformara el 4-clorobenzoato y creciera a sus expensas. El trabajo experimental del grupo alemán constituyó el primer ejemplo de expansión horizontal de una ruta catabólica mediante el reclutamiento de nuevos genes que determinan isoenzimas.

*Pseudomonas* WR216, bacteria derivada de *Pseudomonas* B13 que crece en presencia de 4-clorobenzoato, no puede desarrollarse, sin embargo, a expensas del análogo 3,5-diclorobenzoato; sin embargo, si la bacteria WR216 se cultiva antes en 3-clorobenzoato, suspensiones lavadas de la bacteria mineralizan 3,5-diclorobenzoato, o, lo que es lo mismo: WR216 posee la maquinaria enzimática necesaria para degradar 3,5-diclorobenzoato. ¿Por qué, pues, esa bacteria no puede crecer en presencia de 3,5-diclorobenzoato?

Tal vez, cabría pensar, las enzimas de la ruta no se inducen en respuesta a la presencia de 3,5-diclorobenzoato en el medio de cultivo y, por tanto, no se sintetiza la maquinaria enzimática necesaria para llevar a cabo la mineralización del compuesto. Para analizar esta posibilidad, los autores estudiaron la estimulación de la expresión de los genes *xyl*XYZ por distintos análogos del benzoato, incluidas las formas cloradas. Descubrimos que, mientras que el benzoato, el 3-clorobenzoato y el 4-clorobenzoato eran efectores de la ruta y estimulaban su expresión, el análogo 3,5-diclorobenzoato no actuaba como efector. Ante esa situación nos preguntamos si sería posible aislar mutantes del regulador de la ruta (*xyl*S) que reconocieran, como efector, al compuesto 3,5-diclorobenzoato. La respuesta fue afirmativa. El mutante de *xyl*S que reconoce 3,5-diclorobenzoato recibió el nombre de *xyl*S352. En El Zaidín, J. L. Ramos y C. Michán determinaron que la proteína mutante difería sólo de la silvestre en un aminoácido de los 321 de que consta: sustitución de prolina por arginina en el puesto 256. El gen mutante *xyl*S352 se clonó en un plásmido que se replica en *Pseudomonas*, y se introdujo en la bacteria *Pseudomonas* WR216, que adquirió así la capacidad de crecer con 3,5-diclorobenzoato en el medio.




**7. ENSAMBLAJE DE RUTAS CATABOLICAS para permitir el metabolismo simultáneo de metilbenzoatos y clorobenzoatos. Los cuadros representan a la bacteria *Pseudomonas* B13 manipulada o no genéticamente. El organismo no manipulado genéticamente mineraliza 3-clorobenzoato vía clorocatecol y oxoadipato (*arriba*). El reclutamiento de la benzoato 1,2-dioxigenasa de TOL permite la mineralización de 4-clorobenzoato a través de esta ruta y el metabolismo de 4-metilbenzoato a 4-metil-lactona (*centro*). La posterior clonación de una lactona isomerasa del cromosoma de *Alcaligenes eutrophus* y su transferencia consiguiente al organismo anterior permiten transformar 4-metil-lactona en 3-metil-lactona, y, por lo tanto, la mineralización de 4-metilbenzoato (*abajo*).**

El elemento básico de la ruta de degradación de clorobenzoatos de la bacteria *Pseudomonas* B13 es el bloque de enzimas que permite la mineralización de los clorocatecoles, compuestos que se originan al dihidroxilar los clorobenzoatos. Ese bloque puede ser objeto de expansión vertical mediante la adición de genes que determinen enzimas que permitan la formación de clorocatecoles. De hecho, un trabajo en colaboración entre los grupos de Knackmuss y Timmis permitió la expansión vertical de la ruta para facilitar el metabolismo de clorosalicilatos. *Pseudomonas* B13 no crece en presencia de clorosalicilatos porque carece de la enzima salicilato hidroxilasa, necesaria en la hidroxilación del salicilato para rendir clorocatecol. Sin embargo, el plásmido NAH7 de *Pseudomonas putida* determina una salicilato hidroxilasa que permite la oxidación de una amplia variedad de salicilatos, incluidos metil- y clorosalicilatos, aunque esta bacteria no puede crecer en clorosalicilatos porque carece de las enzimas para la degradación de los clorocatecoles. El gen *nah*G determina la salicilato hidroxilasa; por su parte, el gen *nah*R determina el regulador que, junto con salicilato, controla positivamente la expresión de *nah*G. Ambos genes se clonaron en un vector plasmídico muy versátil y se transfirieron a *Pseudomonas* B13, bacteria que adquirió así la capacidad de crecer en salicilato y clorosalicilatos.

Una situación más compleja es la que requiere el ensamblaje de rutas catabólicas nuevas para el metabolismo de ciertos compuestos. Sólo hay un ejemplo de este tipo de aproximación, que realizó F. Rojo en el laboratorio de Timmis en Ginebra, para eliminar simultáneamente metilbenzoatos y clorobenzoatos. La degradación de estos compuestos se produce por rutas que son incompatibles y que no coexisten en la misma bacteria. La utilización de técnicas de biología molecular, sin embargo, per-

mitió solucionar el problema. De nuevo, el organismo empleado para las manipulaciones fue *Pseudomonas* B13. En primer lugar, se introdujeron en el cromosoma de esta bacteria los genes *xyl*XYZ y *xyl*S; la bacteria resultante se llamó *Pseudomonas* FR1. Esta bacteria, similar a WR216, aunque no idéntica, crece a expensas de 3-clorobenzoato y 4-clorobenzoato, y metaboliza 4-metilbenzoato hasta producir 4-metil-lactona. *Pseudomonas* FR1 no puede metabolizar esta última molécula y, por consiguiente, tampoco puede crecer a expensas de 4-metilbenzoato.

De especial interés fue descubrir que *Pseudomonas* FR1 poseía la capacidad de crecer en presencia del isómero 3-metil-lactona, lo que abría la posibilidad siguiente: si encontráramos un organismo que presentase una isomerasa que convirtiera la 4-metil-lactona en el isómero 3, al incorporar esa enzima en *Pseudomonas* FR1, ésta debería adquirir la capacidad de crecer en 4-metilbenzoato. Se aisló una bacteria del suelo perteneciente al género *Alcaligenes* que poseía una actividad isomerasa que permitía la transformación de 4-metil-lactona en 3-metil-lactona. Recurriendo a técnicas de biología molecular, se clonó la lactona isomerasa de *Alcaligenes* en un plásmido, *p*FRC20P, y éste se transfirió a la bacteria FR1. La bacteria con el plásmido incorporado crece en 3-clorobenzoato, 4-clorobenzoato y 4-metilbenzoato. Más aún. El metabolismo de estos compuestos puede ocurrir de manera simultánea. Lo que se ha hecho en *Pseudomonas* FR1(*p*FRC20P) es ensamblar cuatro segmentos distintos pertenecientes a tres bacterias diferentes. En conjunto, estos segmentos se comportan como una sola vía, perfectamente regulada y coordinada. El resultado es una ruta enteramente nueva.

Sin embargo, una vez que se han construido este tipo de bacterias en el laboratorio, es necesario comprobar dos cosas; primero, que las bacterias manipuladas genéticamente son capaces de sobrevivir bien fuera de las condiciones óptimas del laboratorio y de realizar la función para la que fueron diseñadas; segundo, en caso de emplearlas como descontaminantes, sería deseable que una vez que cumplieran su misión se destruyeran para evitar cualquier riesgo asociado a la transferencia de material genético a organismos indeseados.

El grupo de uno de los autores, en la Estación Experimental del Zaidín, y el grupo de K. Timmis, del Instituto Federal de Biotecnología en Braunschweig, trabajan en la actualidad de forma coordinada para resolver problemas relacionados con esos dos últimos aspectos. Los resultados obtenidos ya señalan que, lo mismo en ecosistemas acuáticos constituidos por aguas residuales y subterráneas que en ecosistemas edáficos, las bacterias que hemos construido sobreviven bien y eliminan los tóxicos recalcitrantes para los que fueron diseñadas. En relación con el segundo apartado, se ha observado que, en condiciones naturales, la transferencia de material genético de microorganismos manipulados a otros microorganismos ocurre a muy baja frecuencia y no parece existir peligro potencial en esa transferencia. A pesar de ello, se está trabajando en la construcción de bacterias en las que ese tipo de transferencia quede reducido al mínimo, así como en bacterias suicidas, que se eliminarían a sí mismas una vez que el contaminante desaparece del ambiente.

Por último, señalaremos que la construcción o modificación de cepas bacterianas en el laboratorio sólo supone una aceleración de los acontecimientos evolutivos naturales, y no una alteración importante del organismo. De hecho, en algunos casos la expansión del espectro de compuestos tóxicos que un organismo puede eliminar requiere sólo la sustitución de un aminoácido en una proteína, de las miles que posee el organismo. Esos cambios ocurren de manera natural y la mutación en cuestión se seleccionaría, a buen seguro, de darse las condiciones que supusieran alguna ventaja. El objetivo último de la manipulación genética de microorganismos no es otro que la aceleración de esos episodios evolutivos en la dirección deseada, de forma que se obtengan rutas catabólicas que contribuyan al bienestar de todos los seres vivos y a mejorar su entorno de vida.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

BROADER EFFECTOR SPECIFICITIES IN REGULATORS OF GENE EXPRESSION. J. L. Ramos, A. Stolz, W. Reineke y K. N. Timmis en *Proceedings National Academy of Sciences*, vol. 83, págs. 8467-8471; 1986.

EXPERIMENTAL EVOLUTION OF CATABOLIC PATHWAYS OF BACTERIA. J. L. Ramos y K. N. Timmis en *Microbiological Sciences*, vol. 4 págs. 228-237; 1987.

ASSEMBLAGE OF ORTHO CLEAVAGE ROUTES FOR SIMULTANEOUS DEGRADATION OF CHLORO- AND METHLYLAROMATICS. F. Rojo, D. Piepper, K. H. Engesser, H. J. Knackmuss y K. N. Timmis en *Science*, vol. 238, págs. 1395-1398; 1987.

# La protohistoria de las lenguas indoeuropeas

*Según el autor, la pista del antepasado común de estas lenguas no conduce a Europa sino que nos lleva más bien a Asia. La supuesta distinción èntre las ramas oriental y occidental de esta familia se ha vuelto hoy borrosa*

Thomas V. Gamkrelidze y V. V. Ivanov

La lingüística, el estudio científico del lenguaje, permite adentrarse mucho más en el pasado de la humanidad que los documentos escritos más antiguos. Comparando lenguas afines o emparentadas, esta ciencia trata de reconstruir sus inmediatos progenitores, hasta llegar finalmente a su más remoto antepasado o protolenguaje. El protolenguaje ilumina a su vez lo que fueron las vidas de quienes lo hablaron y los sitúa en el tiempo y en el espacio.

La lingüística nació del estudio de la superfamilia de las lenguas indoeuropeas, que es con mucho la más numerosa, por la cantidad de lenguas que la constituyen y de individuos que las hablan. Aproximadamente la mitad de la población mundial tiene por idioma materno una lengua indoeuropea; seis de los 10 idiomas en que se publica *Scientific American* –alemán, español, francés, inglés, italiano y ruso– pertenecen a esta superfamilia.

En los últimos 200 años, los lingüistas han venido reconstruyendo, con seguridad y penetración crecientes, el vocabulario y la sintaxis del postulado protolenguaje indoeuropeo. Han procurado desenmarañar las intrincadas sendas por las que aquel lenguaje se fue transformando en lenguas derivadas que se difundieron a través de toda Eurasia, buscando en el origen de tales sendas el hogar patrio del protolenguaje mismo. Los primeros investigadores situaban esa patria en Europa y señalaron unas rutas migratorias a lo largo de las cuales las lenguas hijas habrían evolucionado hasta agruparse en dos ramas, una oriental y otra occidental, claramente definidas. Nuestro trabajo indica que el protolenguaje se originó hace más de 6000 años en la parte oriental de Anatolia y que algunas de las lenguas hijas debieron de irse diferenciando en el curso de migraciones que las llevaron primero hacia el Este y después hacia el Oeste.

La reconstrucción de lenguas arcaicas puede compararse al método empleado en biología molecular para abordar la evolución de la vida. El bioquímico identifica elementos moleculares que desempeñan funciones similares aun en las especies más diversas para deducir qué características tendría la célula primigenia de la que se supone descienden todas esas especies. Así procede también el lingüista, buscando correspondencias gramaticales, sintácticas, léxicas y de pronunciación entre los idiomas conocidos, con miras a reconstruir sus predecesores inmediatos y, en última instancia, la lengua originaria. Las lenguas vivas admiten la comparación directa de unas con otras; las lenguas muertas que han sobrevivido en forma escrita pueden, de ordinario, ser vocalizadas por inferencia a partir de datos lingüísticos internos. Pero las lenguas muertas que nunca fueron escritas sólo pueden reconstruirse mediante comparaciones entre sus descendientes y remontándose hacia el pasado con la atención puesta en las leyes que rigen los cambios fonológicos. La fonología –el estudio del sonido de las palabras– reviste sumo interés para los lingüistas históricos, porque los sonidos son más estables en el transcurso de los siglos que los significados.

Los primeros estudios que se hicieron de lenguas indoeuropeas versaron principalmente sobre las que les eran más familiares a los iniciadores europeos de la lingüística: las de las familias itálica, celta, germánica, báltica y eslava. Ya en el siglo XVI los viajeros europeos se habían dado cuenta de las afinidades entre éstas y las lenguas "arias" que se hablaban en la remota India. Que todas ellas podrían compartir un antepasado común lo propuso por vez primera en 1786 Sir William Jones, jurista inglés y estudioso de las culturas orientales. A él se debió, pues, la que llegaría a conocerse como la hipótesis indoeuropea, que fue la bandera de los fundadores de la lingüística histórica en el siglo XIX.

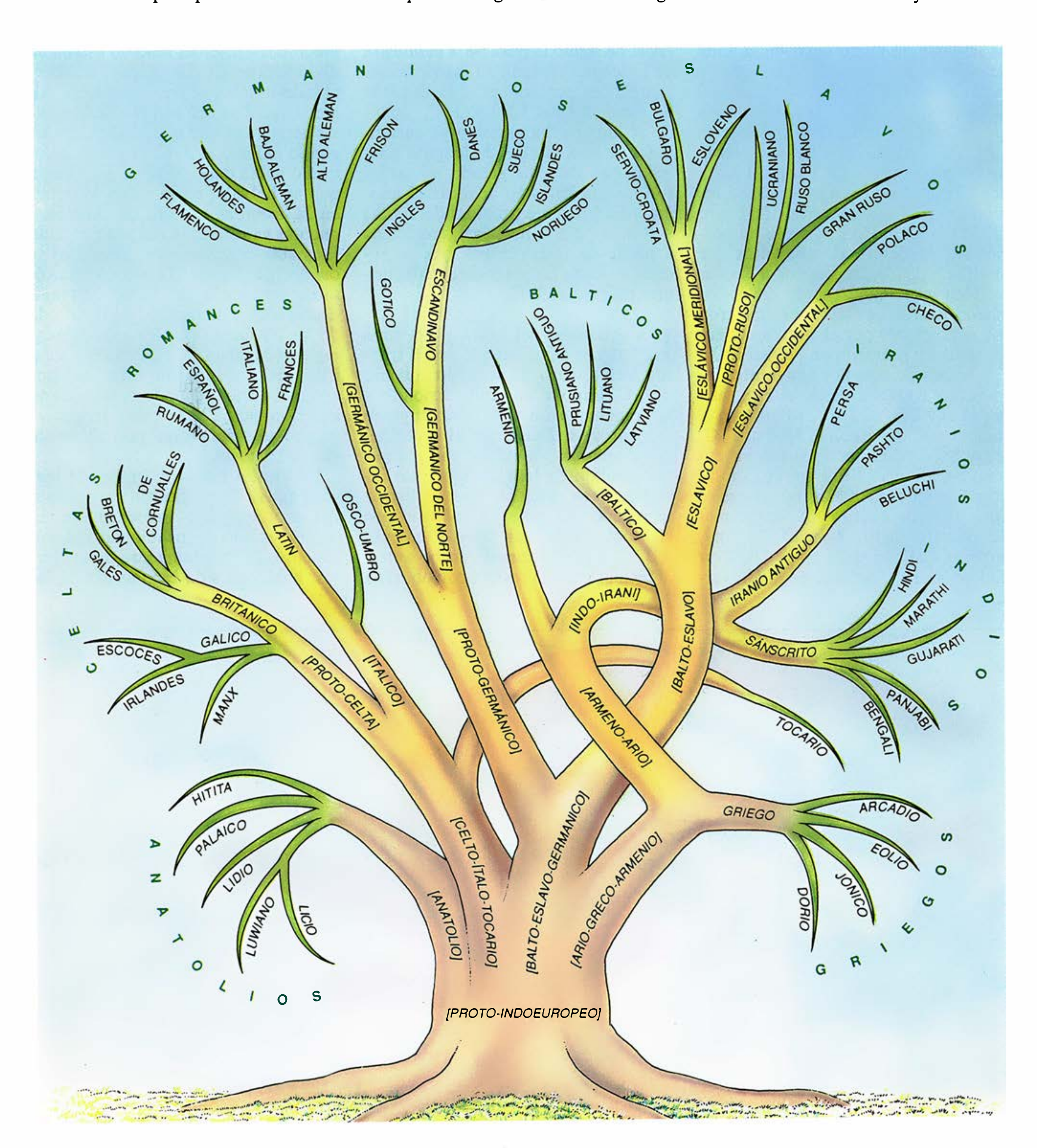
Para reconstruir el lenguaje indoeuropeo ancestral, los primeros lingüistas confiaron a pies juntillas en la famosa ley, enunciada por Grimm, de la *Lautverschiebung* (o del "cambio del sonido"), que postulaba que los grupos consonánticos se van sustituyendo unos a otros a lo largo del tiempo de manera regular y predecible. Esta ley la estableció en 1822 Jacob Grimm, más conocido por la antología de cuentos y leyendas populares que compuso en colaboración con su hermano Wilhelm. La ley de Grimm explicaba, entre otras cosas, por qué en las lenguas germánicas han persistido ciertas consonantes duras a pesar de su universal tendencia a ceder frente a las suaves. El grupo de las consonantes "sonoras" más suaves "b", "d", "g" (seguidas de una momentánea vibración de las cuerdas vo-

THOMAS V. GAMKRELIDZE y V. V. IVANOV son los autores de *La lengua indoeuropea y los indoeuropeos*, obra en dos volúmenes publicada en ruso en 1984. Gamkrelidze es director del Instituto Tsereteli de Estudios Orientales, en Tbilisi, y profesor de lingüística en la universidad de la misma ciudad. Ivanov es profesor de lingüística y jefe del departamento de lenguas eslavas en el Instituto de Estudios Eslavos y Balcánicos de Moscú. Los autores agradecen a Gerard Piel, presidente emérito de *Scientific American*, la ayuda que les prestó en la preparación de este artículo.

cales), localizadas en el protolenguaje, al parecer había dado paso al correspondiente grupo duro "p", "t", "k". Según la ley de Grimm, este cambio ocurrió mediante "insonorización" de aquellas consonantes ("p", por ejemplo, no va acompañada de vibración de las cuerdas). Así, el sánscrito *dhar* pasa por ser una forma arcaica del inglés *draw*, que es a su vez más arcaico que el alemán *tragen* (todos los cuales significan "estirar").

Estas reglas se usaron para reconstruir un vocabulario indoeuropeo que mostrara cómo vivían quienes lo hablaban. Las palabras de ese vocabulario describían unos paisajes y un clima que los lingüistas situaron originalmente en Europa, en la región comprendida entre los Alpes y los mares Báltico y del Norte.

Hoy día, datos más recientes sitúan el origen probable de la lengua indoeuropea en la parte occidental de Asia. Tres generaciones de arqueólogos y de lingüistas han realizado hasta ahora excavaciones y descifrado




**1. ARBOL GENEALOGICO de los idiomas indoeuropeos. En la base, un protolenguaje hasta cuyos vestigios puede remontarse la lingüística; debió de florecer hace más de 6000 años. El protolenguaje se fue fragmentando en dialectos que evolucionaron hasta formar distintas lenguas; éstas a su vez dieron lugar a nuevas generaciones de lenguas hijas. El tocario, una lengua muerta de Asia, guarda remoto parentesco con el celta, una antigua lengua europea. Similaridades entre las familias balto-eslava e indo-irania indican que se influyeron mutuamente antes de que sus hablantes partieran unos hacia el norte y otros hacia el sur. Las lenguas muertas aparecen en letra bastardilla; las que no han dejado restos literarios, entre corchetes.**

manuscritos de casi una docena de lenguas antiguas en diversos lugares, que van de la actual Turquía hasta países orientales tan alejados como Tokaria, en el moderno Turquestán. Sus observaciones, junto con nuevas ideas en teoría lingüística pura, han hecho necesario revisar los cánones de la evolución de las lenguas.

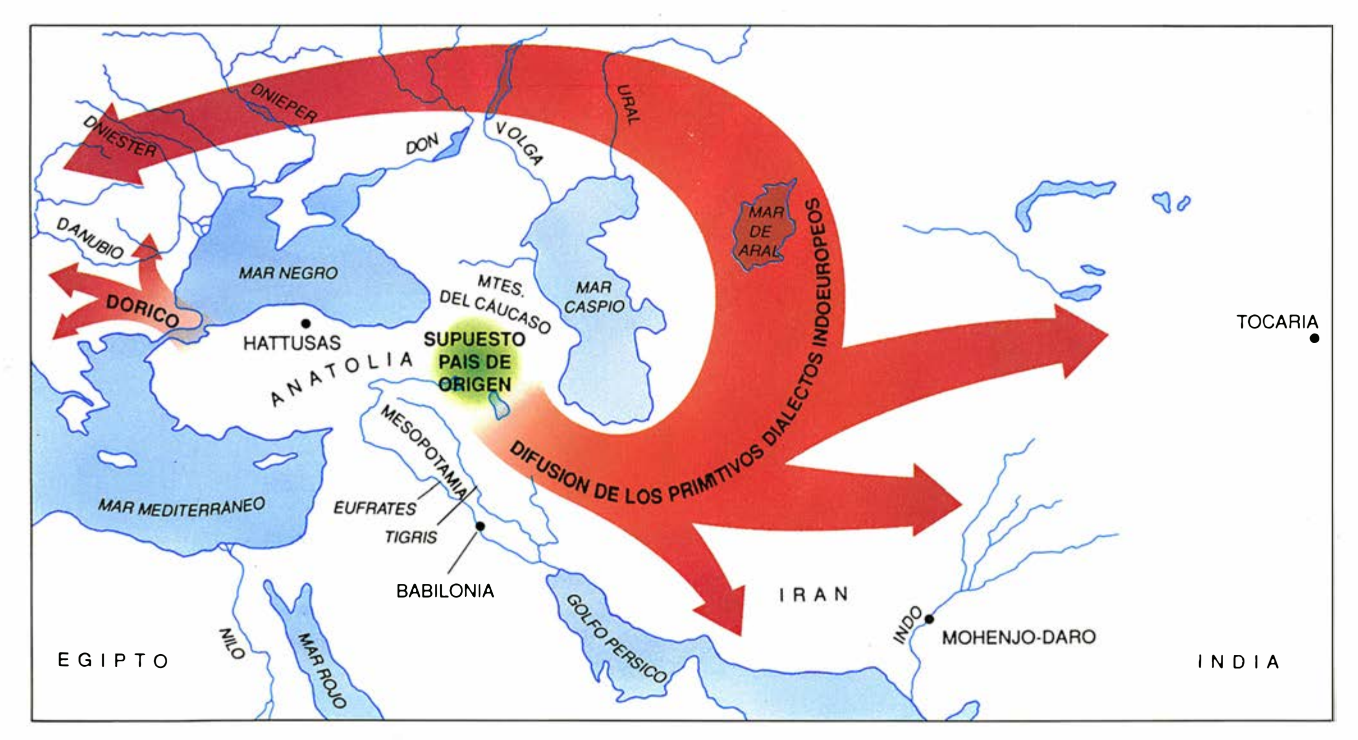
El paisaje descrito por el protolenguaje tal como ahora se concibe debió de hallarse en algún lugar de la zona delimitada por la media luna que se extiende desde la ribera meridional del mar Negro, baja a la península de los Balcanes y cruza hacia el este la antigua Anatolia (los actuales territorios no europeos de Turquía) hasta llegar, por el norte, a la región de los montes del Cáucaso [*véase la figura 2*]. Allí la revolución agrícola proporcionó el excedente de alimentos que impulsó a los indoeuropeos a fundar pueblos y ciudades-estado desde los cuales, hace unos 6000 años, iniciaron sus migraciones por el continente euroasiático y entraron en la historia.

Algunos de aquellos emigrantes invadieron Anatolia desde el este, allá por el año 2000 a. J. C., y fundaron el reino hitita, que hacia el 1400 a. J. C. tenía bajo su poder la Anatolia entera. Su idioma oficial fue una de las primeras lenguas indoeuropeas que se pusieron por escrito. A comienzos de nuestro siglo, Bedřich Hrozný, lingüista que trabajaba en la Universidad de Viena y después en la Universidad Carolina de Praga, descifró las inscripciones hititas (en escritura cuneiforme, antiguo sistema de escritura realizado con símbolos grabados en forma de cuña) de unas tablillas que se habían hallado en la biblioteca de la capital, en Hattusas, 200 kilómetros al este de la moderna Ankara. Allí se encontraron también otras tablillas con escrituras cuneiformes en dos lenguas afines, la luwiana y la palaica. Se siguió la pista de la evolución de la lengua luwiana en inscripciones jeroglíficas posteriores, que databan de alrededor del 1200 a. J. C., cuando el imperio hitita había ya sucumbido. A esta familia de lenguas anatolias que iba emergiendo no tardaron los lingüistas en añadirle el idioma lidio (pariente próximo del hitita) y el licio (afín al luwiano), conocidos a partir de inscripciones que se remontan hasta las postrimerías del primer milenio a. J. C.

La aparición del hitita y de otras lenguas anatolias allá por el tránsito del tercero al segundo milenio a. J. C. impone un límite absoluto a la fragmentación del protolenguaje indoeuropeo. Dado que el protolenguaje anatolio ya estaba para entonces dividido en lenguas hijas, los investigadores calculan que se habría segregado del paterno indoeuropeo no más tarde del cuarto milenio a. J. C. y posiblemente mucho antes.

Esta inferencia resulta corroborada por lo que se sabe de la porción de la comunidad indoeuropea que quedó después de la ruptura con la familia anatolia. De aquella comunidad provinieron las lenguas que persistirían en la época histórica de los documentos escritos. La primera rama que se separó fue la de la comunidad lingüística greco-armenio-indo-irania. Y debió de empezar a separarse en el cuarto milenio a. J. C., pues hacia mediados del tercer milenio estaba ya dividiéndose en dos grupos, a saber, el indo-iranio y el greco-armenio. Algunas tablillas del archivo de Hattutsas atestiguan que a mediados del segundo milenio a. J. C. el grupo indoiranio había dado origen a un idioma que se hablaba en el reino Mitanni, en la frontera sudeste de Anatolia, que era ya diferente del antiguo indo (llamado comúnmente sánscrito) y del antiguo iranio. Textos cretomicénicos coetáneos del reino Mitanni, descifrados a comienzos de la década de los cincuenta por los especialistas ingleses Michael G. F. Ventris y John Chadwick, resultaron estar escritos en un dialecto griego desconocido con anterioridad. Todos estos lenguajes procedían, cada uno por diferente vía, del armenio.

La tocaria fue otra familia de lenguas que se diversificaron muy pronto del protolenguaje indoeuropeo. El tocario es uno de los idiomas indoeuropeos más recientemente descubiertos, habiendo sido reconocido en las




**2. MIGRACIONES Y DIFUSION DE LA AGRICULTURA sacaron al protolenguaje indoeuropeo de su país de origen, que los autores del artículo sitúan en la Transcaucasia, y lo fueron fragmentando en diversos dialectos. Algunos de ellos se extendieron hacia el Oeste por Anatolia y Grecia, otros hacia el Este hasta el Irán, la India y el Asia central. La mayoría de las lenguas occidentales proceden de una rama oriental que rodeó el mar Caspio. El contacto con idiomas semíticos en Mesopotamia y con los kartvelianos en el Cáucaso llevó a la adopción de muchas palabras ajenas.**

primeras décadas de nuestro siglo en textos procedentes del Turquestán chino. Tales textos fueron relativamente fáciles de descifrar, por estar escritos en una variante de la escritura brahmi y porque casi todos ellos eran traducciones de conocidos escritos budistas.

No hace mucho, el estudioso inglés W. N. Henning sugirió que los tocarios no eran otros que los gutianos, que mencionan (en akkadio, idioma semita) algunas inscripciones cuneiformes de Babilonia que datan de finales del tercer milenio a. J. C., cuando el rey Sargón estaba levantando el primer gran Imperio mesopotámico. Si las opiniones de Henning son acertadas, los tocarios serían los primeros indoeuropeos que aparecen en los documentos históricos del Cercano Oriente. Afinidades léxicas entre la lengua tocaria y la ítalo-celta prueban que los hablantes de las dos familias lingüísticas compartían la patria del indoeuropeo antes de que los tocarios emprendiesen su emigración hacia el este.

Hoy día podemos tirar del hilo y remontar las diversas sendas que siguieron las migraciones humanas y la transformación lingüística hasta dar con el protolenguaje indoeuropeo en su propia patria. Este ha sido el fruto de la revisión de los cánones fonológicos a que antes nos referimos. Una indiscutida peculiaridad del sistema sonoro del protolenguaje es, por ejemplo, la casi total ausencia, o supresión, de una de las tres consonantes "p", "b" o "v", que son labiales (el sonido se produce con los labios). Siempre se había pensado que la consonante suprimida era la "b". Pero posteriores estudios fonológicos indicaron que, si en una lengua falta alguna de las tres consonantes labiales, es menos probable que sea precisamente la que suena como "b" en inglés y en otras lenguas europeas vivas.

| SONORAS | SONORAS ASPIRADAS | SORDAS |
|---|---|---|
| (b)<br>d<br>g | bh<br>dh<br>gh | p<br>t<br>k |
| **GLOTALIZADAS** | **SONORAS / ASPIRADAS** | **SORDAS / ASPIRADAS** |
| (p')<br>t'<br>k' | b/bh<br>d/dh<br>g/gh | p/ph<br>t/th<br>k/kh |

**3. TRES SERIES DE OCLUSIVAS (consonantes que se producen cuando se cierra el paso del aire) caracterizaban al proto-indo-europeo. El modelo clásico (*arriba*) supone que una serie era la de las sonoras (seguidas de una vibración de las cuerdas vocales, como la "g" de "guerra"), otra era la de las sonoras y aspiradas (con un sonido como el de la "h" que pronuncian algunos extremeños) y la tercera la de las sordas (como la "k" en el inglés "disk"). En el modelo de los autores (*abajo*), la primera serie la formaban las consonantes glotalizadas (que se hacen sordas por cerrarse el paso del aire cerca de las cuerdas vocales, como en la pronunciación Cockney de la "t" de la palabra "bottle"); la segunda tenía modalidades sonorosas y sonoras-aspiradas, y la tercera sordas y sordas-aspiradas. Las oclusivas glotalizadas llevan apóstrofe; las oclusivas que no se dieron van entre paréntesis.**

Partiendo de esta base, decidimos revisar todo el sistema de consonantes postulado para el protolenguaje, y, ya en 1972, propusimos otro nuevo, propuesta que sigue aún en el crisol del debate, de donde surge el consenso en cualquier ciencia. La controversia se centra ahora sobre todo en los rasgos de parentesco que pueda haber entre el protolenguaje indoeuropeo y otras grandes familias lingüísticas que, por fin, han empezado a poner en claro su origen común.

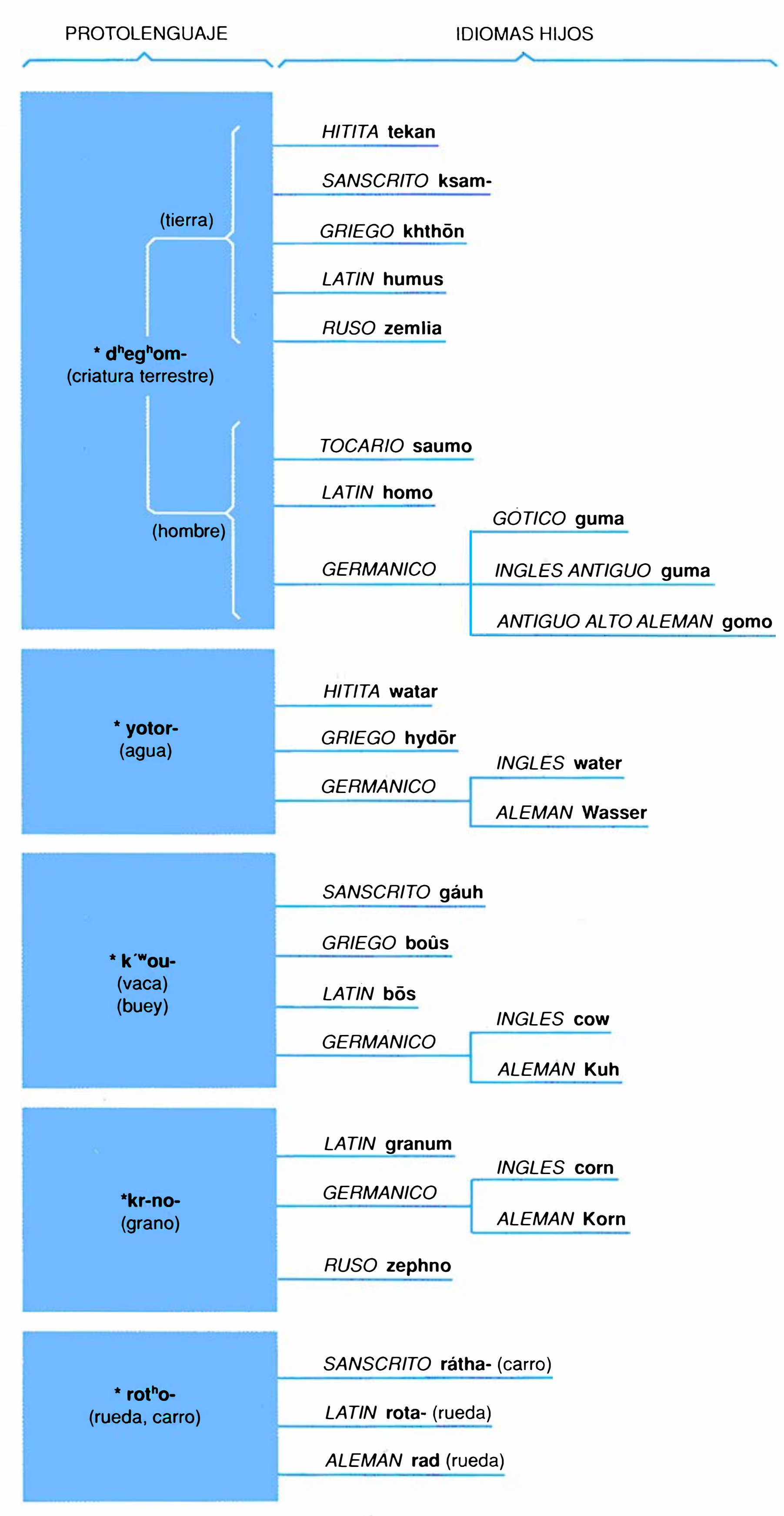
Según la teoría clásica, las consonantes "oclusivas" –las que resultan de la brusca interrupción de la corriente de aire espirado que hace vibrar a la glotis, o a las cuerdas vocales– se dividen en tres categorías [*véase la figura 3*]. La consonante oclusiva labial "b" aparece en la primera columna, en el grupo de las consonantes sonoras; los paréntesis que la encierran indican su supuesta supresión. Figura junto a otras dos consonantes oclusivas sonoras: "d" (ocluida por el contacto de la punta de la lengua con el paladar) y "g" (ocluida por el contacto de la parte posterior de la lengua con el paladar).

En el esquema hemos incluido [*véanse los recuadros inferiores de la figura 3*] las correspondientes consonantes que se producen con oclusión glotalizada: un cierre momentáneo de la garganta a la altura de las cuerdas vocales impide espirar el aire. Aquí la oclusiva labial sorda ("p'") aparece suprimida, seguida de la "t'" y la "k'". Lo que la ("p'") es a la ("b"), sorda y sonora respectivamente, eso son la "t'" a la "d" y la "k'" a la "g". Las oclusiones en que entra en juego la glotis ocurren en muchas familias lingüísticas distintas, particularmente en las de procedencia nordcaucasiana y surcaucasiana (kartveliana). La oclusión glótica, que endurece la consonante, tiende a debilitarse y a desaparecer en la mayoría de las lenguas del mundo. Eso nos llevó a conjeturar que, entre las oclusivas labiales, sería la "p'" y no la "b" la que con mayor probabilidad se habría suprimido en el protolenguaje indoeuropeo.

Nuestro así llamado "sistema glótico indoeuropeo", construido mediante la comparación fonológica de las lenguas vivas con las lenguas indoeuropeas históricamente documentadas, tiene visos de ser más certero que el clásico. La casi total ausencia del fonema labial ("p'") encuentra una explicación fonológica natural, habida cuenta de la evolución de las otras dos oclusivas glotalizadas y del sistema completo de las oclusivas que hemos mostrado.

Al revisar el sistema consonántico del protolenguaje indoeuropeo, también hemos puesto en tela de juicio las vías de transformación que desembocan en las lenguas indoeuropeas históricas. Nuestra reconstrucción de las consonantes del protolenguaje evidencia su mayor afinidad con las lenguas germánica, armenia e hitita que con las del sánscrito. Esto invierte cabalmente la concepción clásica según la cual el sistema sonoro de los primeros habría sufrido una alteración continua, mientras que el sistema sonoro original se habría conservado fielmente en el sánscrito.

La transformación de las consonantes al pasar de la lengua madre a las lenguas hijas se puede ilustrar con el ejemplo de la palabra inglesa *cow* (vaca), cuyo equivalente en alemán es *Kuh*; en sánscrito la palabra que significa "ox" (buey) es *gáuh*, y en griego *boûs*. Hace ya tiempo que se identificó la raíz común de todos estos vocablos en un término común indoeuropeo que designara "vaca" o "buey". Pero ese vocablo tiene formas diferentes en el sistema clásico y en el glótico. En este último aparece la consonante sorda **k'ʷou-* (con el asterisco antepuesto se indica que el vocablo pertenecía al protolenguaje), que lo hace fonéticamente más afín a los correspondientes vocablos del inglés y




**4. RASTREO DE LA GENEALOGIA DE LAS PALABRAS hasta donde llegan los documentos literarios; para las épocas anteriores a la escritura, se reconstruyen de acuerdo con las leyes que rigen la evolución de los sonidos. (En asterisco, las palabras reconstruidas.) En muchas lenguas indoeuropeas los vocablos para designar "hombre" o "tierra" derivan de *$d^heg^hom$-, raíz del protolenguaje.**

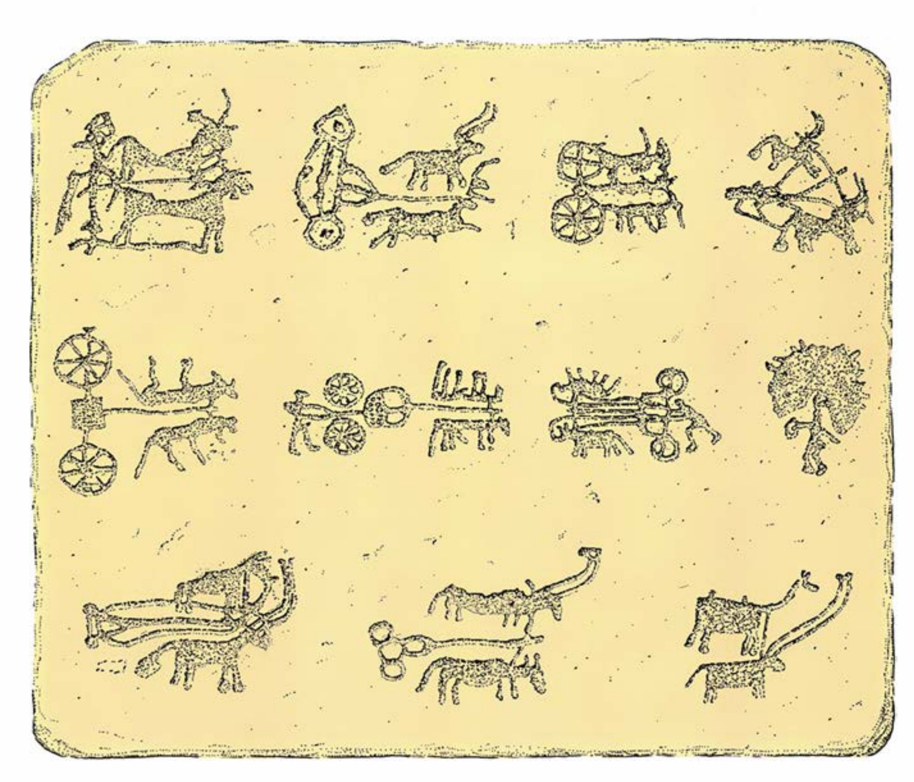
del alemán que a los del griego y del sánscrito.

En el sistema clásico el vocablo en cuestión es **gwou*, prácticamente el mismo que en el sánscrito. De acuerdo con la ley de Grimm, la transformación de **gwou* hasta llegar al correspondiente vocablo alemán requeriría que la primera consonante se hiciese sorda, pasando de "g" a "k". De modo que el sistema glótico parece ser mucho más congruente: elimina la necesidad del ensordecimiento y correlaciona las oclusivas sordas existentes en las lenguas germánicas (alemana, holandesa, escandinava e inglesa) con las oclusivas glotalizadas sordas del protolenguaje indoeuropeo ancestral. En este aspecto, las lenguas germánicas son más arcaicas que el sánscrito y que el griego. El sistema glótico se muestra más conservador que el sistema clásico. Ha acercado más el protolenguaje a algunas de sus lenguas hijas sin recurrir a tan difíciles transformaciones fonológicas como la de la "g" en "k".

Podemos aprender más cosas sobre los indoeuropeos primitivos a partir de otros aspectos de su reconstruido vocabulario. Algunos de sus vocablos, por ejemplo, describen una técnica agrícola cuya existencia se remonta al año 5000 a. J. C. Por aquel entonces la revolución agrícola se había difundido ya hacia el norte desde sus orígenes en el Creciente Fértil, donde los restos arqueológicos demuestran que se practicó el cultivo de la tierra por lo menos desde ocho mil años antes de Cristo. Desde aquella zona la agricultura se fue extendiendo también hacia el sur, donde sustentó las civilizaciones mesopotámicas, y por el oeste, hasta Egipto. Los vocablos indoeuropeos con que se designan la "cebada", el "trigo", el "lino"; las "manzanas", las "cerezas" y sus árboles; las "moras" y sus arbustos; las "uvas" y sus cepas, así como los variados instrumentos o aperos con que cultivar y cosechar tales frutos, describen un modo de vida desconocido en la Europa septentrional hasta el tercero o el segundo milenio a. J. C., según lo acreditan los datos arqueológicos.

El paisaje que describe el reconstruido protolenguaje indoeuropeo es montañoso –como lo evidencian los muchos términos para designar altas cumbres, lagos situados entre montes y ríos de curso torrencial que descienden de manantiales de montaña. Semejante cuadro no podía darse ni en las llanuras centroeuropeas ni en las estepas que se extienden al norte del mar Negro, zonas que han sido propuestas también como país natal del Indoeuropeo. Ese vocabulario se

adapta muy bien, en cambio, al paisaje de la Anatolia oriental y de la Transcaucasia, en cuyos horizontes se alza la espléndida cordillera del Cáucaso. El lenguaje reviste el panorama con la variada flora de esta región, contando con vocablos para hablar del "roble", del "abedul", del "haya", del "carpe", del "fresno", del "sauce", del "álamo blanco", del "tejo", del "pino" o del "abeto", del "brezo" y del "musgo". Hay asimismo términos para referirse a animales que son ajenos al norte de Europa: "leopardo", "leopardo de las nieves", "león", "mono" y "elefante".



**5. PETROGLIFOS encontrados en Uzbekistán (que datan del segundo o del tercer milenio a. J. C.); esos restos constituyen una corroboración arqueológica del dato, aportado por los lingüistas, de que los indoeuropeos tenían carros. Vehículos con ruedas, como los representados, facilitaron las labores del campo y las migraciones resultantes de la creciente necesidad de roturar nuevas tierras.**

La presencia de un vocablo para designar el "haya" ha sido citada –dicho sea de paso– en favor de las llanuras europeas y en contra del Volga inferior como patria putativa del indoeuropeo. Y es cierto que las hayas no se dan al este de una línea trazada desde Gdansk, en la ribera del mar Báltico, hasta la parte más septentrional de las orillas del mar Negro. Sin embargo, en la actual Turquía florecen dos especies de haya (_Fagus orientalis_ y _F. sylvatica_). Contrario al denominado argumento del haya es el argumento del roble: pruebas paleobotánicas ponen de manifiesto que los robles (que entran en la lista del léxico del lenguaje reconstruido) no eran naturales de la Europa nórdica postglacial, sino que empezaron a diseminarse por ella desde el sur como muy pronto hacia el paso del cuarto al tercer milenio a. J. C.

Otra clave importante para la identificación del país en que se originó el indoeuropeo la proporciona la terminología dedicada al transporte sobre ruedas. Hay palabras para "rueda" (_*rot_$^{h}$_o-_), "eje" (_*hak_$^{h}$_s-_), "yugo" (_*iuk'om_) y para los arreos y dispositivos asociados. "Caballo" es _*ek_$^{h}$_os_ y "potro" _*p_$^{h}$_olo_. Las piezas de bronce del carro y los utensilios broncíneos, con que se cortaban y desbastaban los troncos de los árboles de las montañas para fabricar los carros, se designan con palabras que suponen la fundición de metales. Los petroglifos, símbolos grabados en piedras, que han sido hallados en la zona que comprende desde la Transcaucasia hasta la Mesopotamia superior, y entre los lagos Van y Urmia, contienen las primeras representaciones existentes de carros tirados por caballos [_véase la figura 5_].

La postulada patria originaria del indoeuropeo es, si no la única, ciertamente una de las regiones en que se llevó a cabo la domesticación del caballo y se le pusieron arneses y arreos para utilizarlo como animal de tiro en el cuarto milenio a. J. C. Desde allí los vehículos con ruedas se difundirían, con las migraciones de los indoeuropeos en los milenios tercero y segundo a. J. C., por el este hasta el Asia central, por el oeste hasta los Balcanes, y circunvalando el mar Negro arribarían luego al centro de Europa.

El carruaje constituye un elemento significativo de la mezcla de culturas, pues tanto en los pueblos indoeuropeos como en los mesopotámicos aparece el carro formando parte de los ritos fúnebres y de otras ceremonias religiosas. Los contactos con diversas culturas del occidente asiático se ponen de manifiesto también en la coincidencia de varios temas mitológicos; por ejemplo, el del robo de las manzanas de las Hespérides por Hércules y otras leyendas similares que se repiten en los pueblos nórdicos y celtas. Por otro lado, las lenguas semíticas y las indoeuropeas coinciden en identificar al hombre con la tierra. En hebreo, _adam_ significa "hombre" y _adamah_ significa "tierra"; ambos vocablos derivan de una raíz del protolenguaje semítico (cf. Génesis 2,7: "...Dios formó al hombre del polvo de la tierra"). "Humano" y "humus" llegaron a nuestra lengua, a través del latín (_homo_, _humus_), desde _*d_$^{h}$_eg_$^{h}$_om-_, el vocablo para designar tanto "tierra" como "hombre" (etimológicamente "hombre" es "criatura terrestre") en el protolenguaje indoeuropeo. El enraizamiento de las lenguas indoeuropeas en la zona oriental de Anatolia lo sugiere también la abundancia de palabras tomadas de varios lenguajes que allí florecieron: semítico, kartveliano, sumerio e incluso egipcio. A su vez, el indoeuropeo aportó palabras a cada uno de ellos. Nickolai I. Vavilov, eminente botánico genetista soviético, señaló un notable ejemplo de tales intercambios: el ruso _vinograd_ ("uva"), el itálico _vino_ y el germánico _wein_ ("vino") permiten remontarnos hasta el indoeuropeo _*woi-no_ (o _*wei-no_), el protosemítico _*wajnu̯_, el egipcio _*wns_, el kartveliano _*wino_ y el hitita _*wijana_.

Hemos de reconocer que en el amplio territorio en que hemos situado la patria del indoeuropeo no hay restos arqueológicos de ninguna cultura a la que positivamente se les pueda vincular. Los arqueólogos, empero, han identificado unos cuantos emplazamientos que implican la existencia de una cultura material y espiritual parecida a la deducible del léxico indoeuropeo. En efecto, la cultura halafiana, de la Mesopotamia septentrional, decoraba sus vasijas con unos símbolos religiosos –cornamentas de toros y, a veces, cabezas de carneros, que son símbolos masculinos, e imágenes rituales de pieles de leopardo– todos los cuales son com-

partidos por la cultura de Çatal Hüyük, algo posterior, del séptimo milenio a. J. C., en la Anatolia occidental. Ambas tienen afinidades con la más tardía cultura transcaucásica de la región delimitada por los ríos Kura y Araks, que incluye el sur de Transcaucasia, el este de Anatolia y la zona septentrional de Irán.

En los 2000 años transcurridos antes de que los indoeuropeos que se quedaron en su país de origen entraran en los anales de la historia, el éxito de la revolución agrícola produjo una explosión demográfica en la comunidad indoeuropea. Cabe suponer que la presión del crecimiento demográfico impelería la emigración de sucesivas oleadas de indoeuropeos en busca de zonas fértiles por roturar.

La translocación lingüística del hogar indoeuropeo desde el norte de Europa hasta el Asia Menor requiere drásticas revisiones de las teorías acerca de las vías migratorias por las que las lenguas indoeuropeas debieron de expandirse a través de Eurasia. Así, los hipotéticos arios, de quienes se dijo que llevaron el llamado idioma ario, o indoiranio, desde Europa hasta la India –y de los que echó mano la mitología nazi, convirtiéndolos en el prototipo de superhombre nórdico– resultarían ser en realidad los mismos indoiranios, que siguiendo una ruta migratoria más verosímil habrían salido de Asia Menor y, bordeando las estribaciones del Himalaya, atravesarían el actual Afganistán, estableciéndose luego en la India. Europa resulta ser, dentro de este esquema, el lugar de destino, y no el origen, de la migración indoeuropea.

Los pueblos que hablaban el hitita, el luwiano y otros idiomas anatolios realizaron migraciones relativamente cortas, sin salir de su país de origen, y sus idiomas murieron allí con ellos. Las migraciones de mayor alcance de los que hablaban dialectos grecoarmenio-indo-iranios comenzaron con la fragmentación, en el tercer milenio a. J. C., de la principal comunidad idiomática indoeuropea. Dos grupos de hablantes del indoiranio se encaminaron hacia el Este durante el segundo milenio a. J. C. Uno de ellos, el formado por los hablantes de las lenguas kafiri, ha pervivido hasta hoy en el Nuristán, territorio formado por las laderas meridionales del Hindu Kush, al nordeste de Afganistán. En *Cinco Continentes*, libro póstumo que relata sus muchas expediciones botánicas entre los años 1916 y 1933, Vavilov especulaba que los kafirs podrían constituir una reliquia del indoiranio original.

El segundo grupo de indoiranios, que siguieron una ruta más meridional, internándose por el valle del Indo, hablaba un dialecto del que son descendientes las lenguas históricas de la India. Su más primitivo antepasado literario está contenido en los himnos del *Rig Veda*, escritos en una antigua variante del sánscrito. Los pueblos indígenas del valle del Indo, conocidos por los hallazgos arqueológicos que han tenido lugar en su capital Mohenjo-Daro, fueron, al parecer, desplazados por los indoiranios. Tras la separación de los indoiranios y su partida hacia el este, la comunidad greco-armenia permaneció durante algún tiempo en el país de origen. Allí, a juzgar por las numerosas palabras tomadas en préstamo, se mantuvo en contacto con los que hablaban los lenguajes kartveliano, tocario y las antiguas lenguas indoeuropeas que después evolucionarían hasta convertirse en las lenguas europeas históricas. Uno de esos préstamos del kartveliano vendría a ser el homérico *kōas*, “vellón”.

Una tablilla cuneiforme bilingüe, encontrada en los archivos de Hattusas, registra el relato mitológico de un cazador en la lengua hurriana, ya para entonces muerta, con su versión en hitita. Este notable descubrimiento nos ha deparado el vocablo hurriano *ashi*, del que al parecer se derivó el *askós* de Homero, para “pellejo” y “odre”. Antes de emigrar hacia el Egeo, los griegos adoptaron la palabra hitita *kursa*, que, en virtud de un cambio fonológico familiar, se transformó en *búrsa*, otro sinónimo de “vellón”. Estas palabras parecen confirmar la creencia de los griegos de que sus antepasados habían venido del Asia occidental, tal como se refiere en la leyenda de Jasón y los Argonautas, que fueron a buscar el Vellocino de Oro a la Cólquide, país ribereño del mar Negro. La prueba de que los griegos vinieron desde allí a su patria histórica vierte una nueva luz sobre las “colonias” griegas de la costa norte del mar Negro. Ahora cabe considerar que tales colonias eran asentamientos muy primitivos que los griegos habrían ido estableciendo al iniciar las migraciones que les llevaron a su definitiva patria en el Egeo.

Las lenguas europeas históricas –aquellas que dejaron restos literarios– ofrecen numerosos indicios de que los dialectos de los que ellas descendieron habían transitado junto con los tocarios por el interior del Asia central. Estas lenguas tienen muchas palabras en común. Un ejemplo lo constituye la palabra que designa el salmón, lo que en tiempos se tuvo por argumento de peso en pro de una patria ubicada en la Europa nórdica. El salmón abundaba en los ríos europeos que desembocan en el Báltico, y el vocablo *lox* (en alemán *Lachs*) de las lenguas germánicas puede que resuene algo en el *lak-* del hindú, que designa una laca o esmalte que hace pensar, por su color rosáceo, en la carne del salmón. Una especie del salmón, *Salmo trutta*, se puede encontrar en los ríos del Cáucaso, y la raíz *lak-s-* denota al “pez” en las formas primitivas y posteriores del tocario, así como en las lenguas europeas antiguas.

La migración de los que hablaban algunos de los dialectos indoeuropeos primitivos hacia el Asia central es cosa bien establecida por las palabras tomadas de la familia lingüística fineso-ugra, que dio origen a los modernos idiomas finlandés y húngaro. Bajo la influencia del finés-ugro, el tocario sufrió una completa transformación de su sistema de consonantes. Palabras de las antiguas lenguas europeas que han sido claramente tomadas del altaico y de otros lenguajes del Asia central corroboran que sus hablantes residieron allí.

Dando la vuelta en redondo hacia occidente, los antiguos europeos se establecieron por algún tiempo al norte del mar Negro, formando una comunidad federada relativamente poco compacta. De modo que no es del todo erróneo pensar que dicha zona fue como una segunda patria para estos pueblos. Desde finales del tercer milenio y hasta transcurrido todo el primero a. J. C., los pueblos que hablaban las antiguas lenguas europeas se fueron diseminando gradualmente por Europa. Su venida se demuestra arqueológicamente por la llegada de la cultura seminómada de los “túmulos funerarios”, que sepultaba a sus muertos en hoyos cubiertos después con montículos.

La antropometría, que es la medición científica del cuerpo humano, ha empezado a trazar el mapa de la implantación de la fisonomía hitita, tipificada en los rasgos hititas, sobre ciertas poblaciones europeas. A los nórdicos de rubios cabellos y ojos azules se les ha de considerar aún como el producto del cruzamiento de los invasores indoeuropeos con quienes habitaban Europa antes que ellos. La cultura de las poblaciones indígenas de Europa ha quedado inmortalizada con las construcciones megalíticas que, como la de Stonehenge, se alzan en la periferia del continente.

Los idiomas de los anteriores habitantes de Europa, con excepción

del vascuence –lenguaje de estirpe no indoeuropea, con posibles parientes lejanos en el Cáucaso–, fueron relegados al olvido por los dialectos indoeuropeos. Con todo, aquellos lenguajes contribuyeron a las familias de las lenguas europeas históricas con diversas aportaciones por las que se explican algunas de sus diferencias. En su estudio de las culturas megalíticas y de su desaparición, así como de la difusión de la agricultura desde el Oriente próximo, el arqueólogo británico Colin Renfrew ha llegado a ciertas conclusiones sobre la arribada de los indoeuropeos que concuerdan con las nuestras [véase "Orígenes de las lenguas indoeuropeas", de Colin Renfrew; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, diciembre de 1989].

Nuestras deducciones, que descansan casi exclusivamente en datos lingüísticos, deberán confirmarse con investigaciones arqueológicas todavía por hacer. Sin duda alguna, el recuento de las sustituciones de pares de bases del ADN de las células humanas contribuirá al mejor conocimiento del árbol genealógico de quienes hablan las lenguas indoeuropeas y a que se pueda trazar el mapa de sus migraciones. La antropometría y la historia contribuirán también a ultimar el cuadro. Aunque dispuestos siempre a reelaborar y corregir nuestro trabajo, podemos afirmar con un alto grado de certidumbre que el hogar patrio de los indoeuropeos, la cuna de una gran parte de la civilización mundial, estuvo en el antiguo Oriente próximo: "*Ex oriente lux!*"

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA


INDO-EUROPEAN AND THE INDO-EUROPEANS: A RECONSTRUCTION AND HISTORICAL TYPOLOGICAL ANALYSIS OF A PROTOLANGUAGE AND PROTO-CULTURE. Partes I y II. Thomas V. Gamkrelidze y Vjacheslav V. Ivanov. Universidad estatal de Tbilisi, 1984.

ARCHAEOLOGY AND LANGUAGE: THE PUZZLE OF INDO-EUROPEAN ORIGINS. Colin Renfrew. Cambridge University Press, 1988.

RECONSTRUCTING LANGUAGES AND CULTURES: ABSTRACTS AND MATERIALS FROM THE FIRST INTERNATIONAL INTERDISCIPLINARY SYMPOSIUM ON LANGUAGE AND PREHISTORY, ANN ARBOR, NOVEMBER 8-12, 1988. Dirigido por Vitaly Shevoroshkin. Studienverlag Dr. Norbert Brockmeier, 1989.

IN SEARCH OF THE INDO-EUROPEANS: LANGUAGE, ARCHAEOLOGY AND MYTH. J. P. Mallory. Thames and Hudson, 1989.

WHEN WORLDS COLLIDE: INDO-EUROPEANS AND PRE-INDO-EUROPEANS. Dirigido por John Greppin y T. L. Markey. Karoma Publishers, Inc., 1990.

# Juegos de ordenador

## *Los niños plenilunares, las loterías y los meteoritos nos revelan los riesgos de maltratar las matemáticas*

A. K. Dewdney

"Atenerse a precedentes estúpidos y afirmar a ojos cerrados es más fácil que pensar."
—WILLIAM COWPER, *Tirocinium*

Conozco a una enfermera convencida de que nacen más niños durante el plenilunio que en cualquier otra fecha del mes. Hace poco me dijo: "La semana pasada hubo luna llena, y tuvimos el doble de nacimientos de lo normal. Nos pasa continuamente". Otro de mis conocidos suspendió un viaje a Europa el pasado verano por temor a un secuestro aéreo; en cambio, no presta la menor atención al riesgo que le supone viajar diariamente al trabajo desde las afueras. Otro conocido, que lleva jugando a la Bolsa desde hace veinte años, jura por un cierto fondo de inversión: "¡Tendrá mi dinero el asesor financiero cuyos beneficios superen sistemáticamente los índices de la Bolsa durante ocho años seguidos!"

Los ejemplos anteriores ilustran diversas formas de abusar de las matemáticas; esto es, la incapacidad o la falta de disposición para aplicar análisis lógicos sencillos a ciertas situaciones que surgen en la vida diaria. Podemos hallar muchos ejemplos más en un libro de John Allen Paulos, titulado *Innumeracy* ("El hombre anumérico"; Tusquets, 1990). Son analfabetas en este sentido aritmético las personas incapaces de habérselas con ideas sencillas de carácter aritmético, como son analfabetos quienes no saben leer o escribir. Yo prefiero hablar de "abuso a las matemáticas", por ser más amplio su alcance. Caben en tal concepto errores no estrictamente aritméticos; se trata, además, de una noción no falta de dimensiones morales. Ejercemos el desprecio a las matemáticas al dejar de aplicar incluso lo poco que sabemos de ellas a las ideas falaces o cuestionables con que nos tropezamos. No nos gusta que nos tomen el pelo; y a pesar de ello, la mayoría de nosotros nos dejamos embaucar de forma habitual por los políticos, por los medios de comunicación e incluso por nuestros propios amigos.

En los lectores de esta revista, que se cuentan entre los más diestros del mundo en lo que a matemáticas concierne, recae una especial responsabilidad en lo atinente a reconocer y combatir los abusos de índole matemática, allá donde surjan. ¿Cuál es, por ejemplo, la falacia subyacente a la idea de que hay mayor número de nacimientos en plenilunio? La idea en sí no carece de encanto; por lo que a mí se refiere, no me molestaría que fuese cierta. Mas supongamos por un momento que no lo sea, esto es, supongamos que nacen por término medio el mismo número de bebés durante la luna llena que la luna nueva o en los cuartos creciente o menguante. De ser así, ¿cómo podría justificarse que la enfermera siguiera sosteniendo que los períodos "punta" de partos se producen durante la luna llena?

Imaginemos que un día, tras haber atendido quince alumbramientos, nuestra enfermera mira por la ventana y ve luna llena. ¡Ya ha vuelto a suceder! A lo mejor, un mes más tarde la sala de maternidad está relativamente tranquila, pero esta vez la enfermera no se preocupa de observar en qué fase está la luna. Si tan sólo nos fijamos en aquellos sucesos que refuerzan una creencia, estaremos eliminando todos los acontecimientos que podrían falsarla. Este fenómeno, puesto de manifiesto en tantas creencias, se debe a lo que Paulos denomina "filtros".

Podemos hallar filtros casi por doquier. En los casinos, dotados de docenas de máquinas tragaperras, repiquetea sin cesar el tintineo de las ganancias. Cada vez que se alinean las tres fresitas, una máquina desembucha un puñado de monedas, que caen claqueteando sobre una bandeja. Las pérdidas, en cambio, son silenciosas. Quien entre en un casino puede sentir fuertemente la impresión de que todo el mundo está ganando. Y, sin embargo, basta que caigan unas cuantas monedas cada 10 ensayos, por término medio, para que tan sólo 10 máquinas activas logren producir un repiqueteo más o menos continuo.

El fenómeno de filtrado permite explicar mucho más que la ilusión del "casino benéfico". Puede también desorientarnos en nuestras estrategias de inversión bursátil. ¿Tenía razón mi amigo al depositar tal confianza en un fondo que gane más que el promedio durante ocho años seguidos? Veamos una forma sencilla de juzgar la cuestión. Supongamos, en primer lugar, que el éxito de un fondo de inversión depende de la suerte pura y simple, por así decirlo, del lanzamiento de una moneda. Si la moneda muestra "cara", ese año el fondo superará al índice bursátil. Con otras palabras, el valor neto de todos los valores que componen el fondo aumentará más rápidamente que el índice (que es una media representativa de todos los valores cotizados en Bolsa). Por otra parte, si la moneda sale "cruz", el

1. *¿Qué es más probable, que gane en esta lotería o que caiga cerca de mí un meteorito?*

fondo caerá por debajo del índice. Ahora bien, supongamos que, en 1982, estuvieran operando 1024 fondos, y fijémonos en la suerte que ha ido corriendo a lo largo de ocho años. En 1983, una mitad de los fondos, o sea, unos 512, habrían superado el índice. En 1984, la mitad de los anteriores, 256, habrían vuelto nuevamente a batir el índice. Cada año, el número de fondos que continúan exhibiendo resultados superiores se va reduciendo a la mitad: 128, 64, 32, 16, 8, 4. Esta última cifra representa los fondos "súper", aquellos que han producido beneficios insólitamente elevados desde 1982 a 1989.

Una entrevista televisada que se hizo al director de uno de estos fondos "súper" resultó de lo más divertida. ¿A qué atribuía lo excepcional de su éxito? El directivo disertó con alguna extensión sobre ondas, ciclos, parquets activos y parquets pesados. Pero la verdad es que su éxito pudo haber sido cuestión de pura suerte. Un modelo probabilístico sencillo explica perfectamente bien el fenómeno de los superfondos. En vista de tal modelo, los inversores obrarán cuerdamente tomando todos y cada uno de los éxitos proclamados con cierta dosis de escepticismo.

Un interesante embaucamiento bolsístico, que Paulos describe, se basa en otro abuso parecido de las matemáticas. Una agencia de inversión envía cartas a 1024 clientes. En la mitad de las cartas, la agencia pronostica que "La Tirantera Española" va a cotizarse al alza durante los próximos días. En la otra mitad de las cartas, la agencia predice una caída de las cotizaciones. La agencia ha de esperar ahora a que las cotizaciones cambien. Si cambian al alza, se envían otras 512 cartas a los clientes del primer grupo, haciendo notar que la predicción anterior fue correcta, formulando en ellas un nuevo pronóstico. En 256 de las nuevas cartas, se señala que el valor continuará subiendo, mientras que en las 256 restantes se pronostica un descenso de "La Tirantera". El método salta a la vista: un grupo de clientes cada vez más limitado irá quedando progresivamente más impresionado por la capacidad de vaticinio del agente de bolsa. En cierto momento, este pequeño grupo empieza a poner sus ahorros en manos de la agencia, cuando hubiera hecho mejor invirtiéndolos en bonos del Tesoro. El abuso deliberado de las matemáticas puede resultar muy difícil de detectar.

Encontramos otras formas de abuso mucho menos insidiosas, pero sí mucho más difundidas, en toda clase de gráficos, tanto publicados por entidades privadas como por instituciones públicas o gubernamentales. Yo los denomino "tranquilizantes por compresión" y "extorsión por dilatación". En los tranquilizantes por compresión, se reduce la escala vertical, para amortiguar los altibajos de una variable. Por ejemplo, para que un desplome de las ventas dé una impresión menos lamentable, la compañía podría representar sus ganancias anuales en una escala que comprima el descenso en un factor siete. La compañía opta por una escala de 0 a 2100 millones de pesetas, a pesar de que sus ganancias han oscilado entre los 100 y los 400 millones (en pesetas constantes) durante los últimos 30 años. Recíprocamente, una empresa cuyas ventas vayan boyantes podría servirse de la extorsión por dilatación para hacer que las cosas parezcan no buenas, sino extraordinariamente buenas. Al exagerar la dimensión vertical del gráfico, la pendiente de la curva se empina en proporción, induciendo a pensar que la compañía está literalmente "despegando" [*véase la figura 3*].

Paulos da un sorprendente ejemplo de los peligros que puede suponer el analfabetismo matemático en el dominio jurídico. "Una persona va al centro de la ciudad, es asaltada y denuncia que el asaltante era un negro. Sin embargo, cuando el juez instructor del caso reconstruye muchas veces el asalto en condiciones de iluminación similares, la víctima consigue sólo identificar correctamente la raza del asaltante en el 80 por ciento de los casos. ¿Cuál es la probabilidad de que éste fuera efectivamente negro?" Casi todo el mundo respondería sin dudar, "Pues 0,8, claro está".

Para analizar el problema, Paulos formula cierto número de hipótesis razonables. Ante todo, supongamos que, en esa zona, sea negra el 10 por ciento de la población, y que el 90 por ciento sea blanca; admitamos después que el tanto por ciento de asaltadores sea el mismo para una y otra raza, y supongamos finalmente que la víctima tenga las mismas probabilidades de errar en una y otra dirección, esto es, de tomar a un blanco por negro que de tomar a un negro por blanco. En estas condiciones, razona Paulos, "por término medio, en cada centenar de asaltos... la víctima declararía negros a 26 de sus agresores, desglosados así: el 80 por ciento de los diez que realmente eran negros, que hacen 8, más el 20 por ciento de los noventa que eran blancos, o sea 18, lo que da un total de 26. Por tanto, dado que solamente 8 de los 26 identificados como negros lo eran en realidad, la probabilidad de que la víctima fuera verdaderamente atacada por un negro cuando declara que lo fue sería tan sólo de 8/26, o sea, alrededor de un 31 por ciento". El jurado podría reaccionar de distinta forma ante esta información que ante la burda estimación inicial, por dar pie a dudas razonables.

Las rifas y loterías constituyen una maravillosa introducción a la probabilidad y a los abusos que de ella se hacen. ¿Qué probabilidades tengo de ganar el gran premio? Tomemos el caso de las loterías similares a la que en España llamamos "primitiva". Los jugadores adquieren un boleto en el que han de seleccionar seis números que aquí supondremos de 1 a 100 (en la "primitiva" van de 0 a 49). De entrada, es preciso admitir que cualquier serie de seis números es tan perfectamente posible como otra cualquiera, que 1, 2, 3, 4, 5, 6 tiene las mismas probabilidades de resultar premiada que 6, 33, 45, 56, 69, 92.

La probabilidad de ganar se calcula por la fórmula más sencilla de toda la probabilidad:

$$\frac{\text{número de casos favorables}}{\text{número de casos posibles}}$$

Si yo compro, por ejemplo, cinco boletos y elijo una secuencia distinta de números en cada uno, el numerador de esta fracción será 5. El denominador requiere, en cambio, un poquitín de cálculo. ¿De cuántas formas se pueden extraer seis bolas de un bombo que contiene 100? Para la primera hay 100 posibilidades; extraída ésta, quedan 99 posibilidades para la segunda. Por consiguiente, las dos primeras bolas son elegidas entre 100 veces 99 posibilidades, es decir, de entre 9900 casos posibles. En esta lotería, claro está, el orden de aparición de los números es indiferente. Como una serie de dos números puede estar ordenada de dos formas, el número de distintos resultados posibles en dos extracciones es de 9900 dividido por 2, o sea, 4950. Pero el cálculo no está concluido, ni de lejos. El tercer número ha de ser elegido entre los 98 que permanecen en el bombo. No obstante, dos de cada tres series resultantes estarán de más, pues existe ya una serie de tres números que consta de los mismos que esas dos, aunque en distinto orden. El número de resultados posibles en tres extracciones pasa a ser 4950 multiplicado por 98 y dividido por 3, lo que da 161.700. Salta a la vista que el denominador de la fracción está creciendo a gran velocidad.

Para calcular el número total de resultados de esta hipotética lotería, tengo que multiplicar el número anterior por 97, después por 96 y finalmente, por 95, y dividir seguidamente el resultado por 4, después por 5 y, luego, por 6. El valor resultante justo cabe en mi calculadora: 1.192.052.400. Si compro un solo boleto, mis posibilidades de ganar en la lotería son aproximadamente de una vez cada mil millones, y la probabilidad, por lo tanto, del orden de 0,000000001.

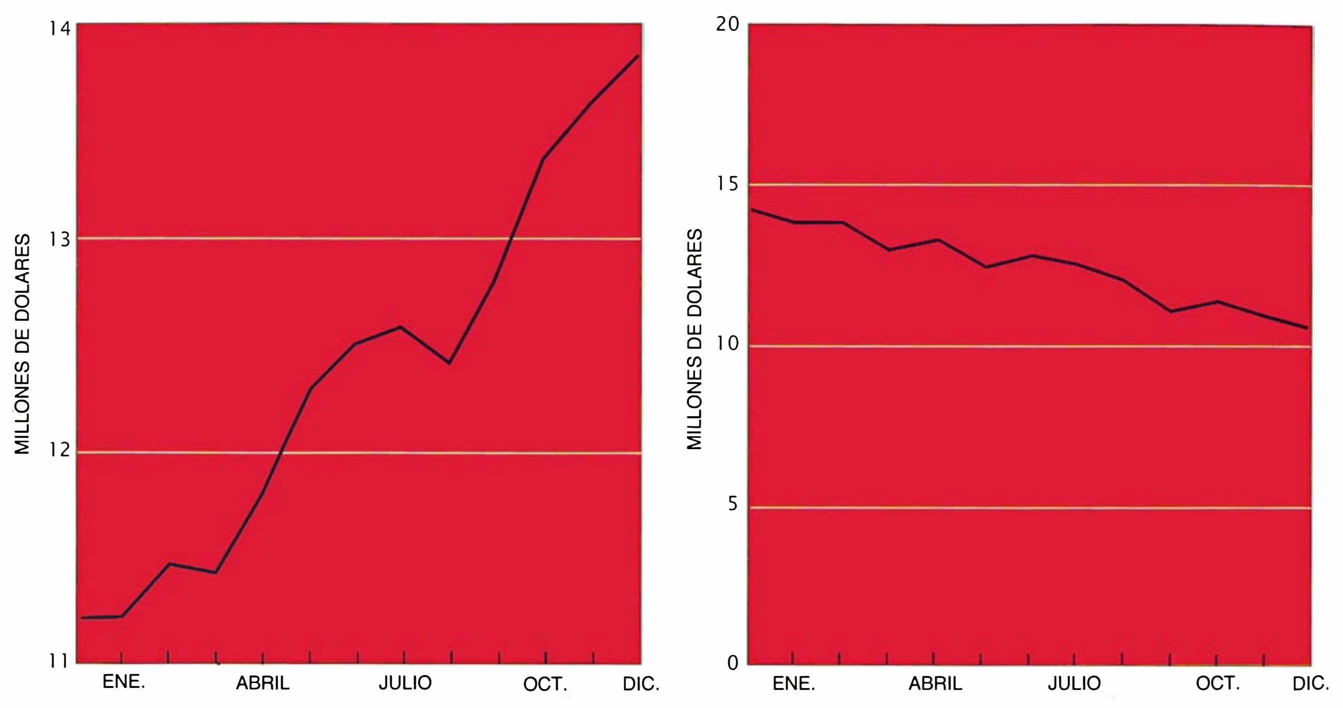
[En la lotería primitiva española, donde se eligen 6 números en el conjunto de 0 a 49, el número de posibles resultados de extracciones (sin el número complementario) es de $50 \times 49 \times 48 \times 47 \times 46 \times 45 \ / \ 6 \times 5 \times 4 \times 3 \times 2 \times 1 = 15.890.700$, y la posibilidad de lograr un pleno es, para cada recuadro cubierto, más o menos de una en cada 16 millones, o sea, una probabilidad de 0,000000063, 63 veces mayor que la lotería del artículo. Estimando que en es España se jueguen entre 10 y 20 millones de recuadros semanales, es de esperar que una de cada dos o tres semanas el premio mayor quede desierto. Nota del traductor.]

La probabilidad de que ganemos el premio mayor jugando un solo boleto es unas dos veces menor que la de que el próximo meteorito que llegue a la Tierra caiga en el kilómetro cuadrado cuyo centro estoy ocupando. Al hacer semejante afirmación, estoy tratando de combatir otro tipo de desprecio de las matemáticas: la anestesia o insensibilidad ante los números. Para poder hacerse idea de los números muy pequeños (o de los astronómicamente grandes), es preciso compararlos con otros que sean, de alguna forma, más significativos.

Tomemos el ejemplo del meteorito que cae a la Tierra. La superficie terrestre es de unos 510.000.000 de ki-




2. *Este gráfico es culpable de, al menos, cuatro cargos de abuso matemático.*




*3. Las gráficas pueden hacer que las tendencias buenas parezcan mejores (*izquierda*) y que las malas no lo parezcan tanto (*derecha*).*

lómetros cuadrados. Las posibilidades de que el meteorito caiga dentro de mi kilómetro cuadrado concreto son de 1 en 510.000.000; la probabilidad, algo menor que 0,000000002. Dado que esta probabilidad es más o menos doble que la de ganar en la lotería con un solo boleto, tendría que comprar dos para quedar a la par. (Los lectores tienen probabilidades mucho mayores de ganar en una hipotética lotería que describiremos al final del artículo.)

Para la mayoría de nosotros, los números grandes y pequeños son fuente inagotable de confusión y desconcierto. Continuamente nos tropezamos con ellos, y no pocas veces perdemos el sentido de la escala a la que pertenecen. Una de las tácticas favoritas de grupos interesados en promover determinadas opiniones consiste en explotar este filón de abuso de las matemáticas. Sea el político que rezonga: "El año pasado, el partido de mi adversario se entrampó en deudas de más de 400 millones en la financiación de su campaña. Yo me pregunto, ¿se puede esperar de un partido así una política fiscal responsable?"

Desde luego, 400 millones de pesetas constituyen una suma impresionante, sobre todo si alguien la debe. A primera vista, casi parece comparable con la deuda nacional, que en el caso de España es del orden de los 2 billones de pesetas.

¿Cuánto dinero son 2 billones de pesetas? Una forma de valorar debidamente cifras así, especialmente cuando se trata de deudas, es distribuirla entre la población activa. Hay en España unos 16 millones de personas en situación laboral. Una deuda de 400 millones, repartida por igual entre ellas, les supondría 25 pts. a cada una. Una deuda de 2 billones le supone a cada "currante" (parados incluidos) unas 125.000 pesetas.

Me preocupa igualmente que los grupos comprometidos con causas que tienen todas mis simpatías provoquen alarmas que distorsionan la realidad. Recientemente, un grupo anticontaminación predijo que el riesgo de cáncer se multiplicaría por 100 en un vecindario donde se habían vertido dioxinas. A primera vista, las perspectivas parecen terribles. ¿No será mejor mudarse enseguida de barrio? Es muy posible que la predicción sea correcta; pero, ¿cuál es el riesgo que verdaderamente corremos? Suponiendo que la probabilidad de contraer cáncer por ingestión de dioxina en una zona "limpia" sea, para empezar, de sólo 0,00001, tal probabilidad habría pasado a ser ahora de 0,001. ¿Qué gravedad reviste esta cifra? La probabilidad de contraer un cáncer de cualquier tipo y morir por esa causa es de 0,2 para la población general. ¿Es la diferencia entre 0,2 y 0,201 motivo suficiente para vender la casa? Como es obvio, se trata de una decisión personal, pero más valdría que fuera una opinión informada.

Otra de las formas de abuso de las matemáticas es la ceguera ante los fenómenos de variación en progresión, especialmente si la variación es de tipo geométrico. Gustamos, deliberadamente casi, de despreciar los fenómenos de crecimiento acumulativo, como los crecimientos a interés compuesto. Si se permite que un número crezca a intervalos regulares en incrementos proporcionales, la sucesión de números resultante puede alcanzar rápidamente valores grandes; más rápidamente, de hecho, de lo que solemos percatarnos. Por ejemplo, si se guardan 100.000 pesetas de dinero costosamente ganado en una cuenta especial que produzca, por ejemplo, un interés anual del 10 por ciento, y si el interés producido se reinvierte al mismo interés, la suma resultante puede llegar a ser francamente grande en un período relativamente corto. Concretamente, una suma invertida al 10 por ciento se duplicaría en 7 años y 3 meses.

Esta ceguera ante los fenómenos de variación compuesta se sufre no sólo para los de crecimiento, sino también para los de devaluación o decrecimiento. El dinero se devalúa a causa de la inflación. Si la tasa anual de inflación rondase en torno al 5 por ciento, el dinero pierde poder adquisitivo (en definitiva, lo que cuenta) a interés compuesto. Cada año que pasa, nuestro dinero vale un 5 por ciento menos que el año anterior. ¿Cuánto tarda una cantidad en perder la mitad de su valor? En el caso de una inflación del 5 por ciento, tan sólo unos 13 años y 6 meses.

La publicidad de bancos y fondos de capitalización explotan no pocas

veces nuestra ceguera ante la variación compuesta. "¡Con nosotros, 100.000 pesetas que usted hubiera invertido en 1970 se habrían convertido ahora en 420.000!" Cierto, pero no tan impresionante como a primera vista parece. Con una tasa anual de inflación del 5 por ciento (y la española es crónicamente superior), las 100.000 pts. invertidas en 1970 tendrían hoy un valor real de 265.000. Así que en términos reales, el aumento no ha sido tanto.

Una modesta capacidad para habérselas con probabilidades, números grandes y otras ideas matemáticas elementales pueden hacernos avanzar un gran trecho hacia la eliminación del abuso matemático en nosotros mismos. Hace falta, empero, una decidida voluntad de aplicar estas ideas para acorazarse contra las pedradas y flechazos de razonamientos torpones.

Prometí antes describir una hipotética lotería. En ella, de hecho, el sorteo se efectúa en cuanto es adquirido el boleto. A lo largo de uno de los lados del billete está impreso un número, el 372981, por ejemplo. La adquisición del billete nos concede el privilegio de rascar la pintura plateada que recubre el otro lado del boleto. Sale allí a la luz otro número, el 448372, por ejemplo. ¡Mala suerte! Desde luego, el número podría haber sido el 372981. En tal caso, el premio es de 100 millones de pesetas, sin cargas fiscales.

Tal lotería podría fácilmente llevarse a la práctica, y por lo que sé, podría existir ya. Los billetes están impresos por uno de sus lados con uno de los números de una serie consecutiva, como 244718, 244719, 244720. En el otro lado del billete está impreso otro de seis cifras, elegido al azar (entre los no utilizados previamente). Se procede entonces a recubrir de pintura al segundo número.

Este sistema comporta ciertos riesgos, tanto para el público jugador como para la institución que organiza la lotería. Pudiera suceder, por ejemplo, que nadie ganara, aun cuando se vendieran todos los boletos. ¿Qué probabilidad tiene este resultado? (Por sorprendente que parezca, guarda escasa relación con el tamaño de la lotería. Incluso aunque la lotería se limitase a números de una sola cifra y hubiera sólo 10 boletos, apenas si variaría la probabilidad de que no la ganase nadie.)

Por otra parte, el riesgo de la administración de la lotería está en que todos ganen: ¡un problema muy serio! ¿Cuántos ganadores serían de esperar, por término medio? La fórmula correspondiente puede venir dada así:

$$(0 \times P_0) + (1 \times P_1) + (2 \times P_2) + \ldots$$

¿Qué significan sus términos? $P_0$ es la probabilidad de que nadie gane la lotería; $P_1$, la probabilidad de que la gane uno solo; $P_2$, la de que sean dos los ganadores, y así sucesivamente. Al multiplicar estas probabilidades por los números 0, 1, 2,... respectivamente, y sumar todos los productos, el resultado da el número esperado de ganadores. ¿Quién podría creer que el número esperado de ganadores es exactamente el mismo que si el número ganador fuese extraído de un bombo, o sea, uno? Dos meses serán tiempo holgado para que los lectores resuelvan estos problemas, cuyas respuestas publicaré.

Estoy interesado por conocer todos y cualesquiera ejemplos de abuso matemático que nuestros lectores hayan observado en sus propias vidas. Publicaré también los casos más interesantes.

Muchos han sido en todo el mundo los ordenadores infestados por tur-mitas, formas de vida cibernética presentadas en los "Juegos de ordenador" de noviembre pasado. Cada tur-mita, cuya vida se inicia en un cuadriculado infinito de casillas negras, va paseando de acá para allá por el retículo, repintando las casillas de acuerdo con su tabla de transición de estados. Cada tur-mita es en realidad una máquina de Turing bidimensional, y los colores que va depositando sobre las casillas de la red serían ordinariamente consideradas como los símbolos que está previsto que las máquinas de Turing vayan leyendo y escribiendo. Hasta las más sencillas máquinas monoestado pueden producir motivos elegantes y complejos, como demostró el personaje humano de la sección, Greg Turk.

Thomas Chrapkiewicz, de Dearborn, Michigan, ha señalado que le resulta mucho más apasionante observar cómo se mueven las tur-mitas que examinar el producto final. Chrapkiewicz preparó un breve programa, en el que dio vida a la tur-mita más sencilla, la que produce una nube de cuadritos coloreados aparentemente al azar y luego sale disparada trazando una línea de aspecto regular. El comportamiento de la tur-mita excitó la curiosidad de Chrapkiewicz, quien se preguntó qué haría la tur-mita si se encontrase con una línea ya implantada en la retícula. A las tur-mitas les gusta seguir líneas, y a veces, en el proceso, las trasladan. Lo que le llevó a la idea de dispersar "nieve" por la retícula, esto es, cuadrados de distintos colores situados al azar, con los cuales pueden interactuar las tur-mitas. Tal proceder prácticamente garantiza comportamientos que nunca entrarán en bucles sin fin.

Tony Durham, conocido autor inglés de fantasía científica, ha programado algunas de las tur-mitas de Turk, particularmente esa que produce una peculiar estructura de aspecto rectangular. Me preguntaba yo si aparecería simetría bilateral en una tur-mita cuya tabla de conducta sólo poseyera simetría cíclica. Durham ha encontrado una variante inversa de su tur-mita que deshace cualquier cosa que pueda realizar su colega directa.

Leonard Pratt escribe desde Hong-Kong, explicando que su programa de tur-mitas es capaz de aceptar cualquier tabla biestado que especifique el usuario. El programa ha permitido a Pratt seguir cierto número de variantes sobre el tema de los dos estados. Al cambiar, aunque sólo sea una de las entradas de la tabla, lo más corriente es que se obtenga una criatura enteramente distinta.

O. A. Olsen, de Trondheim, Noruega, ha puesto en movimiento dos tur-mitas sobre un mismo cuadriculado para observar de qué forma sus cargas se entremezclan en un nube aleatoria de píxeles de colores. Después, una toma una ruta hacia el infinito, trazando, al avanzar, una senda afiligranada. Al cabo, su compañera descubre el canal, "y emprende el mismo camino para reprochar a la otra su desviada conducta."

Finalmente, he de mencionar las preciosas figuras enviadas por Homer C. Waits, de Columbia. Al ensayar variantes de la tur-mita cuatricolor, Waits descubrió que una produce un borrón alargado, desde el cual proyecta de vez en cuando "brazos espirales" finitos. Pero la tur-mita retorna siempre al borrón para hacerlo más complicado todavía, más elongado y aleatorio, antes de proyectar nuevos "espirilos". En el caso de las tur-mitas, nueve décimas partes de la gracia consiste en llegar a ellas.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

LIES, DAMN LIES, AND STATISTICS: THE MANIPULATION OF PUBLIC OPINION IN AMERICA. Michael Wheeler. Liveright, 1976.

THE VISUAL DISPLAY OF QUANTITATIVE INFORMATION. Edward R. Tufte. Graphics Press, 1983.

EL HOMBRE ANUMÉRICO. Tusquets Editores; Barcelona, 1990.

# Juegos matemáticos

## *Armoniosas relaciones (y razones no menos armónicas) entre el mapa y el territorio*

Ian Stewart

La tía Cunegunda hojeaba el álbum de fotografías: "¡Qué mona era Melu de pequeñita! ¡Bien se ve que le gustaba la tarta de chocolate! ¡Mira cómo se había puesto sus mejillitas de pepona!"

Melusina, "el hada del cálculo", que había crecido mucho desde la época de la fotografía, se sonrojó como un tomate y trató de esconderse bajo la mesa. Estas reuniones familiares resultan verdaderamente patéticas, pensaba la chica; nos recuerdan incidentes antiguos y embarazosos, especialmente cuando se tienen 16 años y las mejillas siguen redondas y rellenitas. Melu sacó la calculadora del bolsillo y se puso a desarrollar $e^{\pi}$ en fracción continua, más que nada por matar el rato.

"¡Ah, sí! ¡Y fíjate en esa otra!, dijo Cunegunda. ¡Pablo Emilio, mira, haz el favor! ¿Pablo Emilio...? ¡Pablo Emilio!... ¡Despierta! ¡Aquí está esa en la que llevas gorro de piel, en la fiesta de Año Nuevo!

—He dejado de llevar gorro de piel, hizo notar Pablo Emilio con tono fastidiado. Ya no me queda bastante pelo y la gente lo toma por una peluca.

—Esta fotografía [*véase la figura 1*] me trae muchos recuerdos, dijo Cunegunda. La tomó Pablo Emilio el año pasado, durante las vacaciones. Dinos, Pablo, ¿dónde la tomaste?

—Fue en París.

—Sí, Pablo Emilio, ya se ve que es París, pero ¿en qué sitio de París?"

Pablo Emilio se incorpora en su asiento, se frota los ojos, se cala las gafas y examina la fotografía.

"Ya no me acuerdo, dijo.

—Si es París, el río tiene que ser el Sena, intervino Melu.

—Me parece que la tomé desde lo alto del Arco de Triunfo, añadió Pablo Emilio sin ninguna convicción. O quizá desde la azotea de la Casa de Radio-France.

—No seas bobo, repuso Débora, la madre de Melu. El edificio de Radio-France, aunque medio oculto, se ve a la derecha.

—Voy a buscar un plano."

Pablo Emilio salió de la estancia. Durante varios minutos pudieron oírse ruidos de objetos desplazados, sazonados con algún que otro juramento. Reapareció, congestionado y triunfante, blandiendo un gran plano de París. Toda la familia le rodeó tan de cerca que malamente pudo desplegar el plano, pero por fin pudieron identificar los tres puentes de la fotografía: el puente de Bir Hakeim, el puente del Metro, que arranca de la avenida del Presidente Kennedy, y el puente de Grenelle.

"Me parece que ahora ya lo puedo adivinar, dijo la tía Cunegunda toda animada.

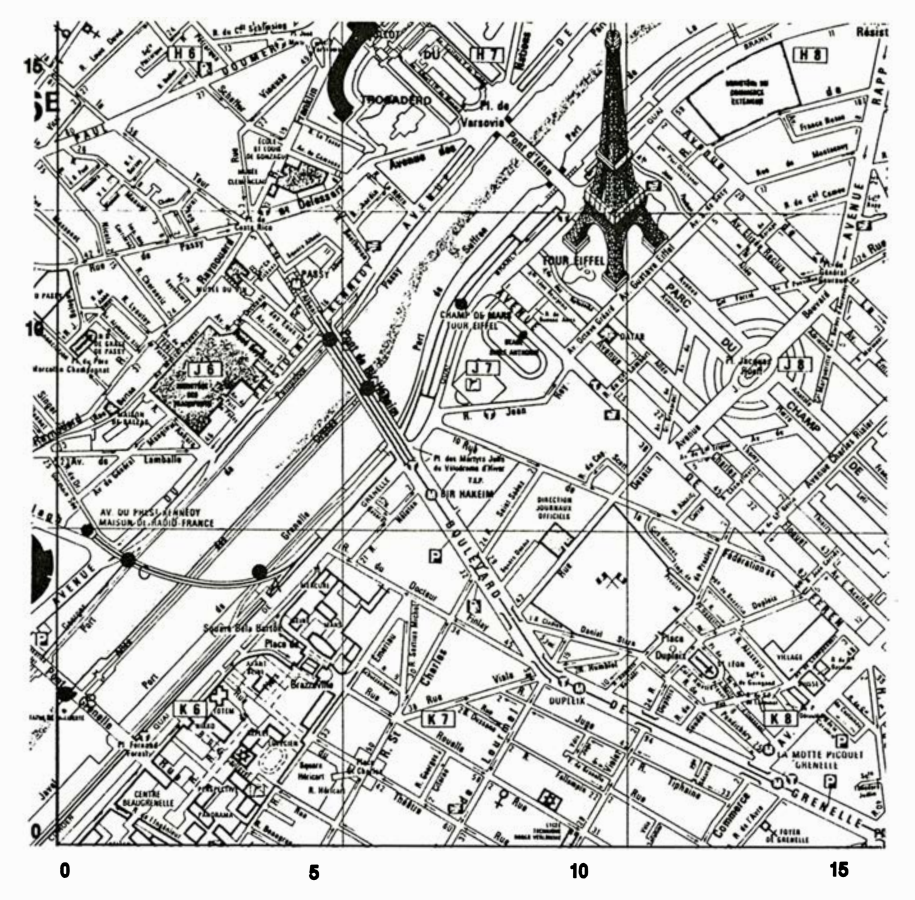
—Cualquiera puede hacer conjeturas, sentenció Débora, zumbona. Conjeturar es bastante fácil. La cuestión es saber si uno lo ha conjeturado bien.

—Mamá tiene razón, saltó Melu. No hay que olvidar que el centro de la fotografía puede no corresponder a la dirección en que apunta la cámara fotográfica. Esta foto es una ampliación, y pueden haber cambiado el encuadre.

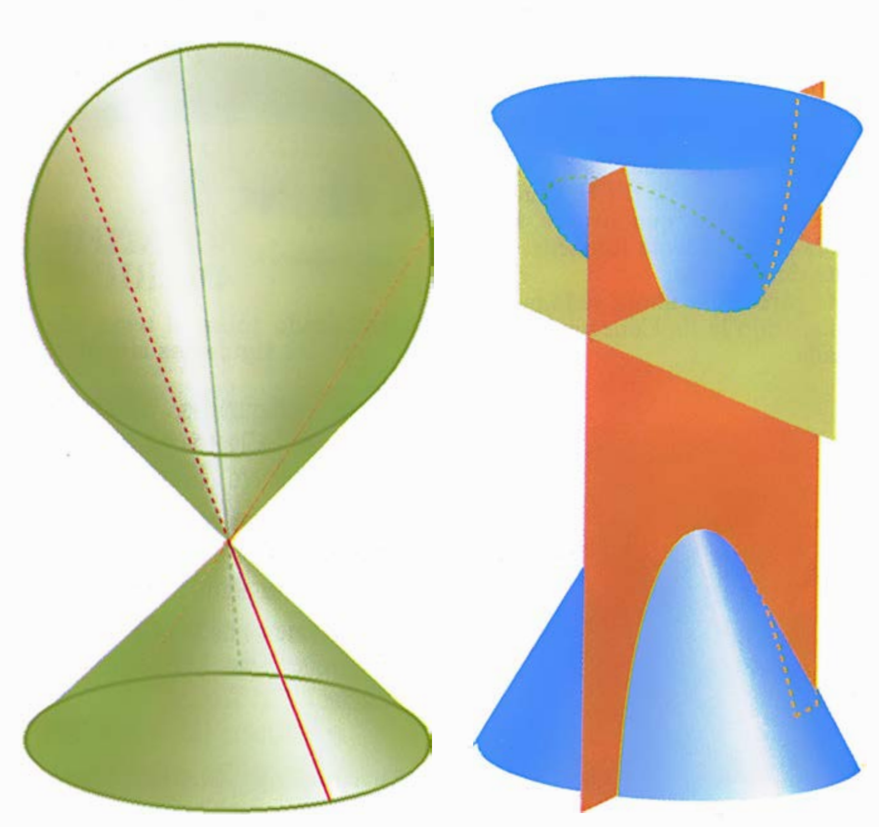
—¡Pablo Emilio, concéntrate! Fuiste tú quien tomó la foto, así que tienes que acordarte desde qué sitio", remató Cunegunda con su optimismo autoritario habitual.



*1. Un panorama parisiense. Pero, ¿desde dónde se ha tomado la foto?*




2. *Plano de la zona de la fotografía, en el que se han señalado los puntos* A, B, C, D, E, *que luego se utilizarán.*



3. *La proyección de un círculo, como la efectuada por el ojo o por un objetivo fotográfico, es una elipse.*

4. *Elipse e hipérbola, cónicas fundamentales, son secciones planas de un cono. La hipérbola tiene dos ramas.*

Pero Pablo Emilio había vuelto a dormirse, y mostraba en su sueño tanta felicidad que nadie se atrevió a despertarle.

"Melu –dijo Débora– ha estudiado geografía en la escuela. A lo mejor ella puede ayudarnos.

–No creo que la geografía nos sirva de gran cosa, respondió Melu.

–¡Oh...!, dijo tía Cunegunda, desilusionada. Una chiquilla que normalmente es tan inteligente, que ha sido tan bien alimentada, tan bien educada...

–¡La geografía no, cortó Melusina, pero puede que las matemáticas sí nos puedan ayudar!"

El rostro de tía Cunegunda se cubrió de inquietud, pero una rápida consulta al licor de grosella le devolvió los ánimos.

"¿Y cómo puede ser eso, Melu querida? ¡El problema que tenemos aquí es de fotografía!

–No; es cuestión de geometría proyectiva, y de las más interesantes, además, atajó Melu.

–¿Qué es la geometría proyectiva, cariño mío?, preguntó Débora.

Verás, mamá, ¿te has dado cuenta de que si miras un plato desde un costado ya no parece circular, sino ovalado?

–¿De veras? Nunca me había fijado.

–Eso es porque estás tan habituada a ver objetos desde un lado que tu cerebro compensa la deformación sin que te des cuenta. Fíjate bien en este plato, objetivamente."

Débora entrecerró los párpados y bizqueó.

"¡Pues es verdad! ¡Es mucho más largo que ancho!

–Exactamente. El plato se aplasta, y en lugar de ver un círculo tú ves una elipse. Ello se debe a que la forma circular es proyectada sobre la retina del ojo [*véase la figura 3*]. Otro tanto sucede en fotografía. En una proyección, las circunferencias no conservan por lo general su forma circular y, por ese motivo, la noción de "círculo" no tiene interés en geometría proyectiva; las nociones interesantes en geometría proyectiva son las que permanecen invariantes en una proyección.

–¡Oh...!, dijo Débora. Pablo Emilio, ¿has oído eso? ¿No te parece interesante?"

Pablo Emilio exhaló un vigoroso ronquido.

"Esto... Oye, Melu.

–¿Qué, mamá?

–¿Cuáles son las cosas invariantes por proyección?

–Ni los ángulos, ni las longitudes, ni las superficies, mamá. Ni siquiera las rectas paralelas. Una de las nociones más importantes de la geometría

proyectiva es la de sección cónica, dijo Melu.

—¿Sección cómica? ¿Cómo en las historietas gráficas de los dominicales? Mafalda me encanta, y las páginas de humor de...

—No, tiíta. Sección cónica, o simplemente, cónica, es lo que se obtiene al cortar un cono mediante un plano. En la geometría ordinaria existen dos cónicas fundamentales, la elipse y la hipérbola [*véase la figura 4*] Existen también algunos tipos más particulares de cónicas —la parábola, la circunferencia, el par de rectas, la recta doble e incluso el punto— que corresponden a cortes especiales.

"Si proyectamos una cónica cualquiera, siempre se obtiene otra cónica, porque siempre se trata de la proyección de un círculo. Las diversas cónicas no son, pues, sino proyecciones de circunferencias, y ése es el motivo de que los platos parezcan elípticos.

"He dicho que la proyección no conserva las distancias (pensemos en los radios de un círculo) y tampoco conserva las razones de distancias. Por ejemplo, el segmento azul de la figura 5*a* está dividido en dos partes, una de las cuales es doble de la otra. Tras la proyección obtenemos el segmento rojo, cuyas partes ya no están en la misma relación. De hecho, dadas dos series de tres puntos alineados $ABC$ y $A'B'C'$, siempre se puede encontrar una proyección que transforme una razón en otra [*véase la figura 5b*]. Por tanto, mientras nos mantengamos en la geometría proyectiva no podremos extraer información de una terna de puntos.

—Jamás tuve intención de hacerlo, dijo Cunegunda.

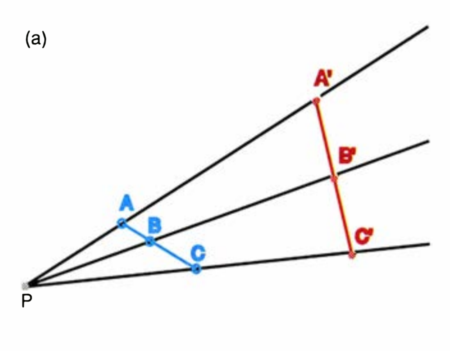
—La cosa es distinta con cuatro puntos, prosiguió Melu. Si esos puntos están alineados, existe un invariante proyectivo, la razón doble. Por "invariante" se entiende que no cambia por proyección. Existe también una razón doble para todo haz de rectas, es decir, para todo sistema ordenado de cuatro rectas concurrentes en un punto [*véase el recuadro 1*].

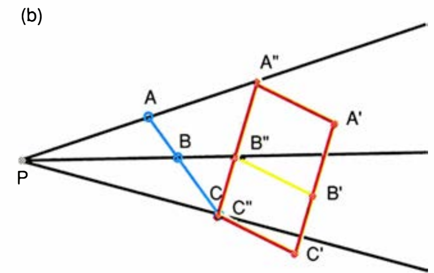
—En la escuela, cuando yo era pequeñita, terció Cunegunda, la geometría hablaba de teoremas, no de fotografías. En los teoremas no había razones, y ya no digamos, razones dobles. Melusina, enúncianos un teorema de esta geometría proyectiva.

—Si te empeñas, tiíta... He aquí uno que es particularmente elegante. Es conocido como teorema de Chasles. Toma una cónica, cualquiera que sea, y cuatro puntos arbitrarios $A$, $B$, $C$, $D$ en ella. Ahora tomas un punto $P$ de la cónica, donde tú quieras, y únelo a $A$, $B$, $C$ y $D$, para formar un haz de rectas. El teorema dice que la razón doble de esas cuatro rectas no depende del punto $P$ [*véase la figura 7*]. Y habrás notado que las nociones que intervienen: cónicas, haces, razones dobles, son nociones útiles en geometría proyectiva.

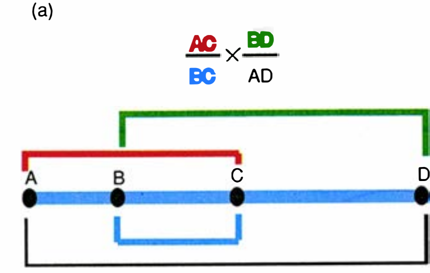
—Excelente, dijo Cunegunda.

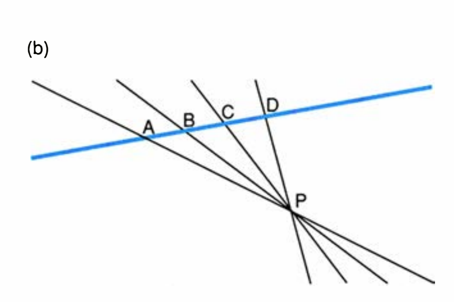
—Pues yo, cuando era pequeña, dijo Débora, en tardía reacción a la palabra "teorema", tenía que estudiar unas cosas horribles llamadas demostraciones —"Los triángulos $ABC$ y $XYZ$ son iguales, porque los dos tienen iguales sus tres lados"— que eran terriblemente difíciles.




*5. (a) Las proyecciones no conservan las longitudes.* BC *es dos veces más largo que* AB, *pero* B′ C′ *es más corto que* A′ B′. *(b) Las razones de las longitudes formadas por dos conjuntos cualesquiera de tres puntos alineados pueden ser puestos en concordancia por proyección.*




*6. (a) La razón doble de cuatro puntos alineados. (b) La razón doble de un haz de cuatro rectas que pasan por* P *se obtiene hallando la razón doble (en el mismo orden) de los cuatro puntos de intersección con una secante. Esta razón doble no depende de la secante.*

**Recuadro 1: la razón doble**

Dados cuatro puntos alineados, *A, B, C, D,* considerados en ese orden, se define su razón doble *r*:

$$r = \frac{\overline{AC}}{\overline{BC}} \times \frac{\overline{BD}}{\overline{AD}}$$

Si los puntos se proyectan en $A'$, $B'$, $C'$, $D'$, sus proyecciones están alineadas y su razón doble

$$r' = \frac{\overline{A'C'}}{\overline{B'C'}} \times \frac{\overline{B'D'}}{\overline{A'D'}}$$ permanece invariable, es decir, $r = r'$.

En particular, esta razón doble subsiste invariable si se toma una fotografía de estos puntos, cualquiera que sea el punto desde el que efectúe la toma.

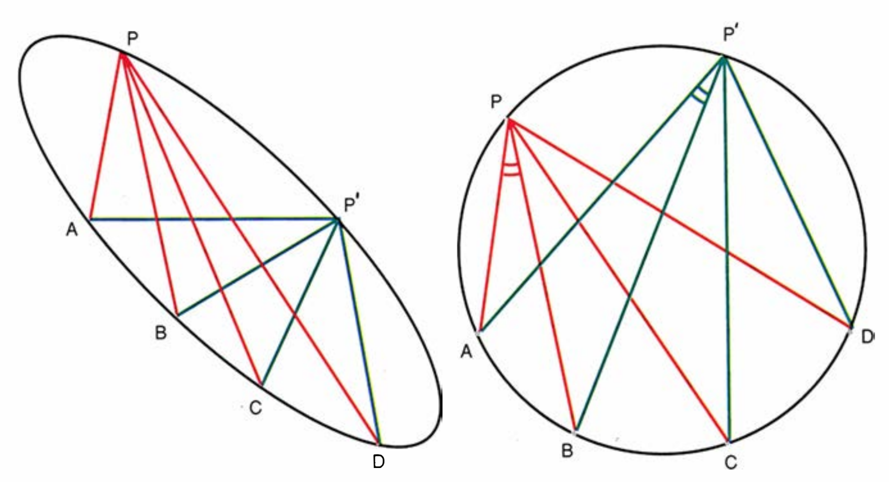
En el caso de un haz de cuatro rectas concurrentes en *P* [*véase la figura 6b*] tomadas en orden, se define una razón doble sin más que cortarlo por una recta cualquiera en *A, B, C, D* (en el mismo orden que las rectas), y utilizando después la fórmula para *r* dada arriba. Esta razón doble no depende de la secante elegida, pues la razón doble de cuatro puntos alineados es invariante por proyección (y, en particular, por la de centro *P*).

Existe una fórmula que proporciona la razón doble en función directa de sus ángulos, a saber:

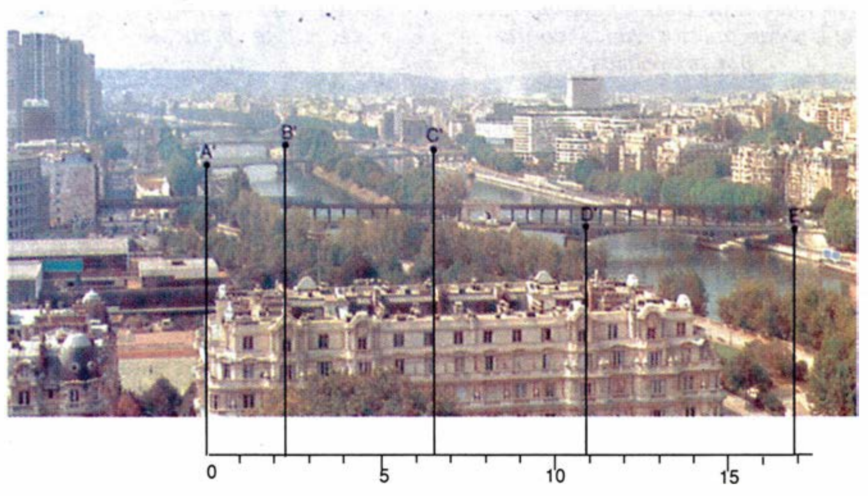
$$r = \frac{\text{sen } APC}{\text{sen } BPC} \times \frac{\text{sen } BPD}{\text{sen } APD}$$

**Recuadro 2: la razón doble**

He aquí un precioso ejemplo donde se utiliza la geometría ordinaria en la demostración de teoremas de geometría proyectiva. Comencemos por proyectar la cónica sobre una circunferencia. Dado que la razón doble es un invariante proyectivo, basta demostrar el teorema en este caso particular. Tenemos que demostrar que, dados cuatro puntos fijos *A, B, C, D* de una circunferencia y un punto *P* móvil sobre esa misma circunferencia, la razón doble del haz de rectas *PA, PB, PC, PD* es independiente de *P* [*véase la figura 7*]. Hemos visto en el recuadro 1 una fórmula que expresa la razón doble directamente en función de los ángulos *APC, BPD, BPC* y *APD.* Ahora, estos ángulos no dependen de la posición del punto *P* [*véase la figura 7b*] porque interceptan el mismo ángulo.




*7. El teorema de Chasles: los haces emanados de* P *y de* P' *tienen la misma razón doble. Para demostrarlo se proyecta la cónica sobre un círculo, lo que no altera la razón doble. La demostración es trivial para un círculo, por la igualdad de los ángulos correspondientes en uno y otro haz.*




*8. Evaluación de las distancias horizontales entre los cinco puntos* A', B', C', D', E' *de la fotografía, correspondientes a los puntos* A, B, C, D, E *del plano* [véase la figura 2].

**Recuadro 3: cálculo de la razón doble a partir de la fotografía**

Márquense los cuatro puntos *A', B', C', D' correspondientes a A, B, C, D,* como se muestra en la figura 8. Sus distancias horizontales, medidas desde la izquierda (la unidad es arbitraria), son 2,2; 6,5; 10,9; 16,9. La razón doble vale:

$$\frac{\overline{A'C'}}{\overline{B'C'}} \times \frac{\overline{B'D'}}{\overline{A'D'}} = \frac{6{,}5}{4{,}3} \times \frac{8{,}7}{10{,}9} = 1{,}206$$

—Mamá, para complacerte he demostrado el teorema de Chasles en el recuadro 2.

—Gracias, nenita mía. Continúa, esto es fascinante.

—Bueno, pues todavía no os he contado lo mejor. El teorema de Chasles enuncia también que la recíproca es verdadera. Si fijamos cuatro puntos *A*, *B*, *C*, *D* y atendemos a los haces de rectas de vértice *P* cuyos rayos pasen en orden por *A*, *B*, *C*, *D* y cuya razón doble tenga un valor constante arbitrario, pero fijo, entonces el punto *P* se encuentra situado sobre una cónica que pasa por *A*, *B*, *C*, *D*. Existe una tal cónica para cada valor de la razón doble. Esta es la versión del teorema de Chasles que nos ayudará a averiguar desde dónde se ha tomado la fotografía.

Débora afirmó con el gesto.

"Desde luego.

—¿Ya has visto cómo, mamá?

—Bueno —dijo la madre con cierta incomodidad—, no exactamente del todo, pero ya he captado la idea general.

—Te lo voy a explicar. No voy a buscar desde qué altura sobre el suelo se ha tomado la instantánea, sino que voy sencillamente a tratar de localizar su posición en el plano. La fotografía no es más que una proyección. Comencemos por elegir cuatro puntos en la fotografía, a los que llamaremos *A'*, *B'*, *C'*, *D'*, que sepamos localizar con precisión en el plano: el extremo derecho del puente del Metro [*punto A en el plano de la figura 2*], el punto medio del puente de Grenelle (*B*), el extremo izquierdo del puente del Metro (*C*) y el punto medio del puente de Bir Hakeim (*D*). Calculemos la razón doble de estos cuatro puntos midiendo las distancias horizontales (obtenidas por proyección) separando los cuatro puntos correspondientes *A'*, *B'*, *C'*, *D'* en la fotografía. Según mi calculadora, la razón doble es igual a 1,206 [*véase el recuadro 3*]

"Fijémonos ahora en los puntos correspondientes sobre el plano, *A*, *B*, *C*, *D*. Sea *P* el centro del objetivo. Sabemos que el haz de vértice *P* que pasa por *A*, *B*, *C*, *D* tiene también una razón doble de 1,206.

—¿Por qué?

—Pues porque la fotografía es una proyección de las posiciones del plano, y hemos visto ya que las proyecciones conservan la razón doble.

—Ah, es cierto.

—Y, según el teorema de Chasles, ello significa que el punto *P* debe encontrarse sobre una cierta cónica; nosotros vamos a calcular qué cónica es ésta, y a dibujarla sobre el plano."

Débora reflexionó un instante.

"Sí, pero eso no nos determinará la

posición de $P$, que puede encontrarse en cualquier lugar de esa cónica.

—Desde luego; pero supongamos hallada una segunda cónica sobre la cual también haya de encontrarse $P$.

—¡Qué sagaz! Entonces $P$ se encontrará donde las cónicas se corten. Se parece un poco a la búsqueda de la ubicación de una emisora de radio. ¡Se determina una recta que pase por ella desde un primer punto, luego se hace lo mismo desde otro punto, y la emisora habrá de encontrarse en la intersección de ambas rectas!

—Exactamente; sólo que nosotros vamos a valernos de curvas.

—Ya veo. Así que tendremos que encontrar otros cuatro puntos de la fotografía que podamos situar con precisión sobre el plano.

—No. Un solo punto bastará."

Débora reflexionó un instante y afirmó con la cabeza, pero Cunegunda seguía dubitativa.

"Mira, tiíta. Elijamos el extremo derecho del puente de Bir Hakeim [*punto E de la figura 2*]. Fijémonos ahora en los cuatro puntos $A$, $B$, $C$, $E$; los puntos $A$, $B$, $C$ han sido utilizados ya, pero el cuarto es diferente, y eso es lo único que importa. Sobre la fotografía, los puntos $A'$, $B'$, $C'$, $E'$ correspondientes tienen razón doble 1,305; basta repetir el cálculo del recuadro 3, intercambiando los papeles de $D$ y $E$. Sabemos así que $P$ se encuentra sobre la única cónica que pasa por $A$, $B$, $C$, $E$ y cuya razón doble correspondiente es igual a 1,305.

—¡Brillante! Lo que ahora te falta por hacer es encontrar las dos cónicas.

—Puede que eso requiera algún tiempo", dijo Melu, y desapareció en su cuarto.

Volvió a la sala cosa de un par de horas más tarde, trayendo consigo el recuadro 4, que la chica comenzó a explicar.

"... así que la fotografía debió haber sido tomada desde el punto de coordenadas 9,0 y 10,1, concluyó ella con aire triunfal.

—¿Que es...?

—Bueno, parece que sea el arranque de la avenida de Suffren [*véase la figura 10*].

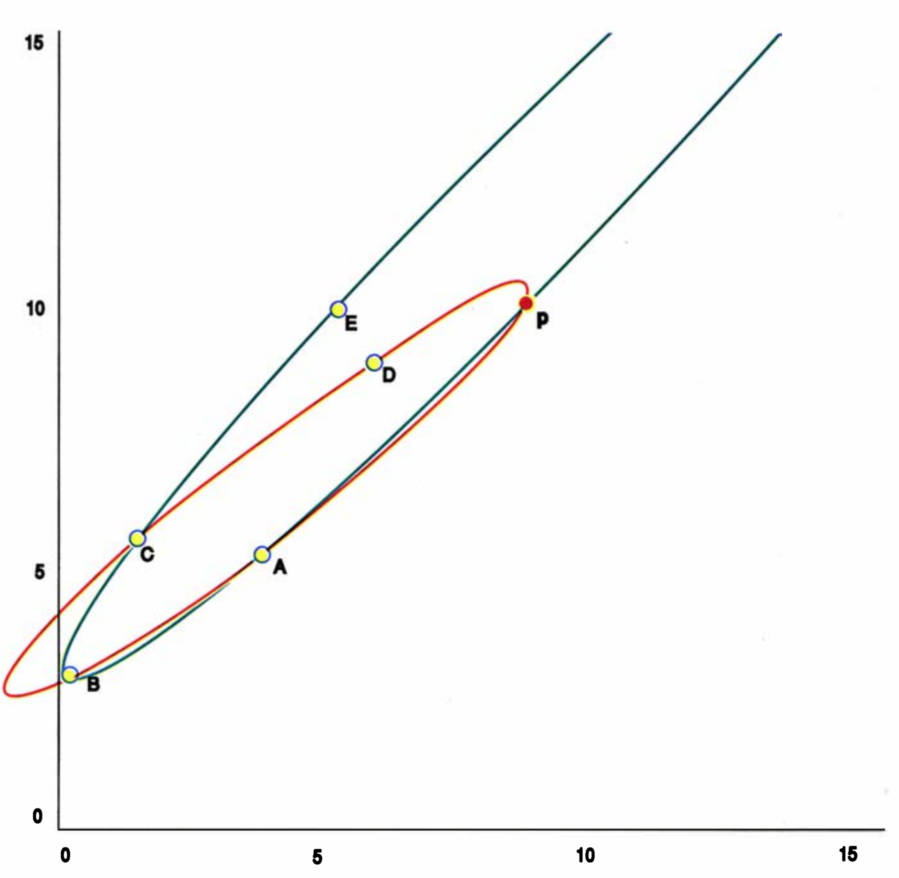
—Eso es una calle que está cerca de la torre Eiffel.

—Es lo que yo había supuesto, dijo la tía Cunegunda.

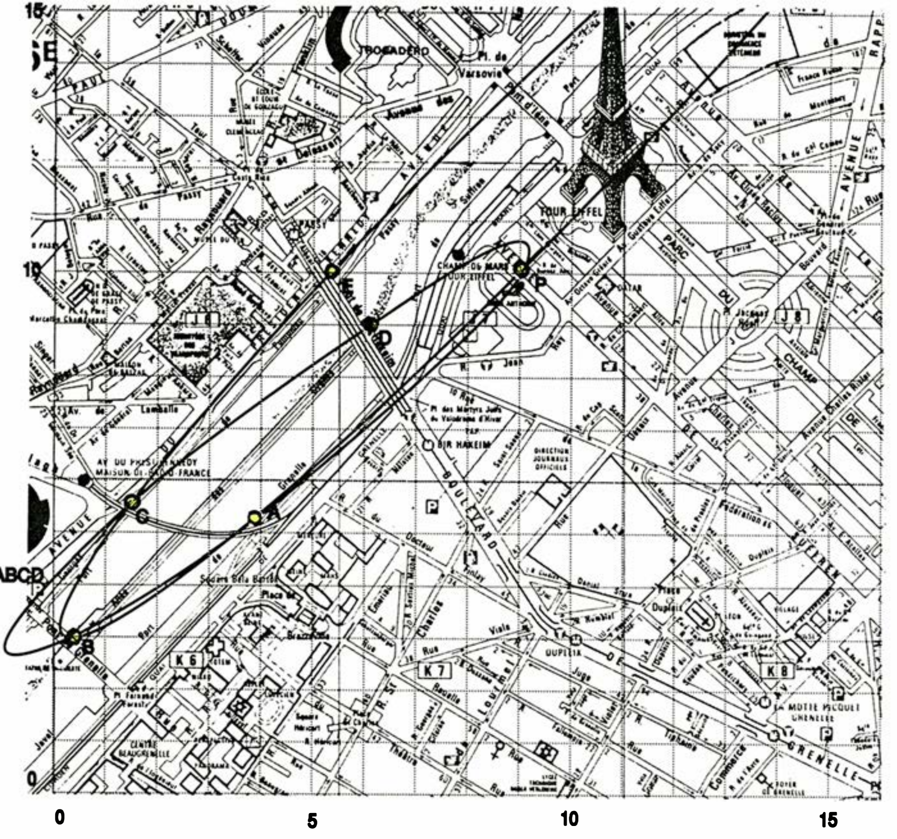
—¿La avenida de Suffren?, preguntó Débora.

—No, la torre Eiffel.

—Bravo, tienes muy buena intuición, tiíta. Pero es el cálculo el que demuestra este resultado. Con una pequeña incertidumbre que no debe sorprendernos, dada la dificultad de localizar exactamente los puntos so-




*9. Trazado de las dos elipses correspondientes a los conjuntos de puntos* ABCD *y* ABCE. *Las elipses se cortan en los* A, B, C, *como no podía dejar de ocurrir, y en un cuarto punto,* P, *que es la posición del objetivo.*




*10. Superposición de la figura 9 sobre la figura 2. Al parecer, el fotógrafo se encontraba muy cerca de la avenida de Suffren.*

**Recuadro 4: cálculo de la ubicación del objetivo**

Utilizando las coordenadas del plano precisadas en la figura 2, denotaremos $(x,y)$ a las de la ubicación buscada, $P$, del objetivo y construiremos la tabla de las coordenadas $(x_A, y_A)$, etc. de los puntos $A, B, C, D$:

$x_A : 3{,}9 \quad y_A : 5{,}3$
$x_B : 0{,}4 \quad y_B : 3{,}0$
$x_C : 1{,}5 \quad y_C : 5{,}6$
$x_D : 6{,}1 \quad y_D : 9{,}0$

Introduzcamos las expresiones $L_{AB} = (y_A - y_B)x - (x_A - x_B)y + x_A y_B - x_B y_A$ y las correspondientes expresiones $L_{AC}$, $L_{DB}$, $L_{DC}$ similares.

$L_{AB} = 2{,}3x - 3{,}5y + 9{,}58 \qquad L_{DB} = 6x - 5{,}7y + 14{,}7$
$L_{AC} = -0{,}3x - 2{,}4y + 13{,}89 \qquad L_{DC} = 3{,}4x - 4{,}6y + 20{,}66$

Se demuestra en geometría analítica que, para un valor dado de la razón doble $r$, la cónica de las posibles posiciones de $P$ tiene por ecuación:

$$(r-1)\, L_{AC}L_{DB} - r\, L_{AB}L_{DC} = 0.$$

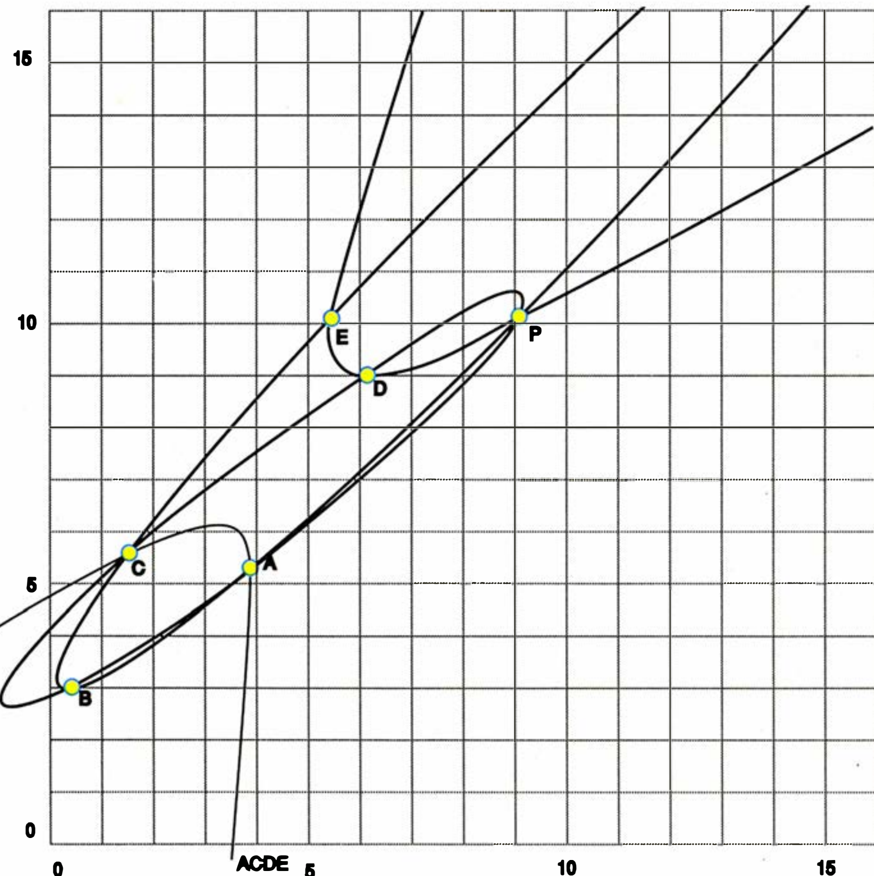
Sabemos que $r = 1{,}206$; así, pues, la ecuación de la cónica se escribe:

$$-9{,}802\, x^2 + 24{,}497\, xy - 16{,}598 y^2 - 80{,}329x + 116{,}775y - 196{,}633 = 0$$

Tracemos seguidamente esta curva sobre un sistema de ejes prefijados (una referencia cartesiana) por ejemplo, dando valores a $x$ y resolviendo respecto de $y$ la ecuación resultante, que es de segundo grado. Esta cónica se encuentra representada en la figura 10, al igual que la cónica obtenida reemplazando $A, B, C, D$ por $A, B, C, E$ y cuya ecuación, resultado de cálculos similares, es:

$$-13{,}969\, x^2 + 27{,}539\, xy - 14{,}554\, y^2 - 73{,}711\, x + 91{,}346\, y - 144{,}352 = 0$$

Las dos curvas resultan ser elipses: cortan en cuatro puntos, tres de los cuales son, obviamente, $A$, $B$, $C$; el cuarto corresponde a la posición $P$ del objetivo. Por medición directa sobre la referencia, se obtienen para $P$ las coordenadas $(x,y) = (9{,}0; 10{,}1)$. Melu no tiene más que situar este punto sobre el plano de París.




*11. Cuando se utilizan los puntos* A, C, D, E, *la cónica es una hipérbola, que confirma la ubicación de* P. *Hemos representado aquí esta hipérbola y las dos elipses de la figura 9.*

bre el plano. Además, el método es bastante sensible a los pequeños errores de medida.¡De todos modos, ha sido un bonito ejercicio!"

Muy agitada, la niña blandía en alto la calculadora.

"Y puedo rehacer los cálculos a partir de medidas más precisas.

—¡No, no!, le suplicó su madre. Muchísimas gracias, Melu. Me parece a mí que estas dos elipses están muy próximas una de otra. Eso hace que la determinación del punto de intersección $P$ resulte bastante imprecisa.

—Sí, podría tantear con otros conjuntos de cuatro puntos. Tal vez fuera preferible elegir $A$, $C$, $D$, $E$."

*¿Es realmente preferible? Pruebe el lector de llevar a cabo los cálculos por sí mismo, si puede dedicarle una hora al problema, y compare su resultado con el de Melu.*

En ese instante, Pablo Emilio se agitó entre sueños, resopló y se puso en pie de un salto.

¡Ya me acuerdo! ¡Ya me acuerdo de todo! exclamó. ¡Tomé la fotografía desde el primer piso de la torre Eiffel!

—Eso ya lo sabemos, amigo mío, dijo Débora.

—¿Cómo habéis podido...?

—Melu lo ha calculado, dijo Cunegunda.

—Pero no veo cómo...

—Verás, papá. Es cosa de geometría proyectiva, y además, una de las más interesantes..."

## Soluciones

Si se utilizan los puntos $A$, $C$, $D$, $E$ la razón doble vale 1,524, y la cónica tiene la ecuación:
$-8{,}081\, x^2 + 16{,}772\, xy - 2{,}420\, y^2 - 50{,}702\, x - 42{,}361\, y + 266{,}466 = 0.$

Se trata esta vez de una hipérbola. Ha sido representada [*véase la figura 11*] sobre la misma cuadrícula que las dos elipses. Fijémonos en que pasa también por el punto (9,0; 10,1), confirmando así nuestro primer resultado, pero tiene la ventaja de cortar a la primera elipse (y también, además, a la segunda) en un ángulo mayor, lo que facilita una determinación más precisa del punto de intersección $P$.

En el conjunto $A$, $B$, $C$, $D$, $E$ podemos escoger cinco distintos conjuntos de cuatro puntos (pues elegir cuatro puntos de cinco equivale a elegir uno, el eliminado), con lo que, si se dibujan, se pueden hallar otras dos cónicas que pasen por $P$. Hay por consiguiente diez pares de cónicas, cada uno de los cuales proporciona una estimación de la ubicación de $P$. ¿No habrá una combinación —como la media, por ejemplo— de estas diez soluciones, cuyo error sea el mínimo posible?

# Libros

## *Cajal, problemas de química y biología, la Tierra airada y teoría de la clasificación*

Agustín Albarracín, Claudi Mans, Pilar Sesma, Agustín Udías y Luis Alonso

RECOLLECTIONS OF MY LIFE. SANTIAGO RAMÓN Y CAJAL. Traducción de E. Horne Craigie y Juan Cano. Prólogo de W. Maxwell Cowan. The MIT Press. Cambridge, 1989.

La reciente lectura de una biografía de Severo Ochoa, obra de Marino Gómez Santos, ha hecho revivir en mí, una vez más, el viejo drama de la investigación española. Se muestra en el libro la imposibilidad de llevar a cabo una tarea productiva dentro de nuestra patria, tanto por el ambiente como, lo que es más grave, por la política de grangerías y rencillas, impropia de un país civilizado. Viene todo ello a cuento, ante la presencia también en estos días, entre mis manos, de la nueva reedición de los *Recuerdos de mi vida* de Santiago Ramón y Cajal, aparecida hace un año en los Estados Unidos, y que no es sino la reproducción de las anteriores *Recollections of my Life*, traducción de E. Horne Craigie y Juan Cano efectuada en 1937 y reimpresa en 1966, en su primera edición patrocinada por la American Philosophical Society, en la segunda por The MIT Press, a quien se debe la reciente versión que comento.

En efecto, en 1937, y con la autorización expresa del autor, concedida muy poco antes de su muerte, veían la luz en los EE.UU. los *Recuerdos* de Ramón y Cajal como volumen 8 de las *Memoirs of the American Philosophical Society*, cuidadosamente traducidos por E. Horne Craigie, profesor asociado de anatomía y neurología en la Universidad de Toronto, y supervisados por Juan Cano, profesor asociado de español en la misma universidad. Las *Recollections* constituían la traducción de las ediciones de los *Recuerdos* aparecidas en Madrid entre 1901 y 1923. Los traductores señalaban especialmente la doble condición de esta autobiografía: ser documento de considerable valor para la historia de la ciencia y ser a la par testimonio de la vida de un hombre, más allá de su condición de médico e investigador. Faceta esta última que obligaba, en la versión inglesa, a una cuidadosa traducción que respetase en lo posible la propia originalidad del texto español.

La edición inglesa primitiva, basada como se dice en la española de 1923, salvo la adición de un pie de página correspondiente a la primera, respetaba el contenido total de la primera parte de los *Recuerdos*, recortando notablemente las páginas dedicadas a resumir las publicaciones científicas de Ramón y Cajal así como las ilustraciones del original. Se veía enriquecida, en cambio, con una "Conclusión" del traductor que recogía los últimos años de la vida del sabio español.

El éxito de la empresa debió ser grande, por cuanto en 1966 fue preciso realizar una segunda edición, a cargo ahora, repito, de la MIT Press. También se agotó con el decurso de los años, obligando a la celosa conservación de los ejemplares existentes hasta el punto, se nos dice, de que su utilización no fue posible para una entera generación de jóvenes neurólogos norteamericanos.

Retomemos el hilo primero de nuestra reflexión. ¿Por qué ese despertar del viejo drama de la esterilidad investigadora española, relacionando además la biografía de Ochoa con la de Ramón y Cajal? Viene ello a cuento porque, en esta nueva reedición de las *Recollections of my Life*, aparece un texto nuevo: un prólogo de M. Maxwell Cowan, vicepresidente y director científico del Howard Hughes Medical Institute, firmado en Bethesda en diciembre de 1988. Nos narra en él que en determinada ocasión oyó decir a Sir John Eccles, el famoso neurofisiólogo, premio Nobel en 1967, que muchas veces se había planteado la pregunta de quién fue el máximo científico de comienzos del siglo XX, Sir Charles Sherrington o Santiago Ramón y Cajal, respondiéndose él mismo, al parecer de mala gana, "que he llegado a la conclusión de que Cajal, probablemente, fue más grande". Pero, esto es lo más grave, añadía socarronamente: "Después de todo, Cajal no tuvo el beneficio de una educación en Cambridge". ¿Será entonces preciso para triunfar como investigador abandonar España –caso de Ochoa– y formarse en el espíritu anglosajón? Al margen del chauvinismo evidente de Sir John Eccles, la respuesta a este grave interrogante nos la ofrecen también los últimos años de Severo Ochoa en España y su intento –¿frustrado?– de implantar entre nosotros los modos estadounidenses.

No voy a sacar a relucir –no es ahora ocasión y, por otra parte, nada más fácil desde los estudios de Laín: "Cajal por sus cuatro costados" en el Expediente Administrativo publicado por el Ministerio de Educación y Ciencia, o el Prólogo a mi libro *Santiago Ramón y Cajal o la pasión de España*, editado por Labor hace ahora doce años– el problema de nuestra posible incapacidad para la investigación científica y las posibles explicaciones que el propio Cajal nos ofrece sobre el tema en sus *Reglas y consejos*. Lo que me importa señalar es el sentido de esta reedición de sus memorias, en inglés, muestra palpable –no descubro nada nuevo– de la permanente actualidad de su figura y de su obra.

Nos dice Maxwell Cowan en su referido prólogo que son pocos los biólogos que se han dedicado a ofrecernos sus memorias, quizá porque –de nuevo la ironía– "la autobiografía es una rama especial de la ficción". Sea una u otra la explicación de tal hecho, no es fácil acceder al propio sentimiento y a las vivencias originales de la mayoría de los investigadores. Quizá con una punta de exageración, Maxwell reduce su número a Charles Darwin y a Santiago Ramón

y Cajal. En relación con éste afirma cómo, tras la lectura de la edición de 1937 que realmente le fascinó, lo convirtió en libro de frecuente repaso y en fuente de ilustración para sus discípulos, con la esperanza de que tomasen inspiración y buscasen bríos en el camino de la consecución de un objetivo: el de desentrañar con tesón y firmeza cualquier problema biológico, aun de la complejidad del que constituye la organización y función del sistema nervioso.

Tres posibilidades, pues, ofrece hoy la lectura del libro de Ramón y Cajal a los científicos de lengua inglesa: la propia formación, la formación de las generaciones en marcha, la ejemplificación. Cajal maestro, Cajal guía, Cajal ejemplo.

Para los neurólogos ya formados, ¿qué sentido puede tener la obra de Ramón y Cajal que comento? Todo libro histórico, y éste lo es ya en sumo grado, constituye una fuente de conocimiento del pasado, en que se mezclan la posibilidad de acceso al decurso de los fenómenos biológicos –en nuestro caso– y la fundamentación, a su través, de los saberes propios. Los neurólogos ya formados podrán leer con interés en los *Recuerdos* cajalianos la situación que acerca del conocimiento de la estructura fina del sistema nervioso existía allá por los decenios últimos de la pasada centuria e inicios de la nuestra; las concepciones que en torno de la función de esa estructura circulaban por Europa entonces; la distribución geográfica de la comunidad investigadora. No sólo conocer los antecedentes: también esclarecer la realidad de aquella vida que, alejada por supuesto del mundo de Cambridge, fue capaz en sus modestos laboratorios de Barcelona y Madrid de alcanzar a plasmar, con su ingenio y habilidad, la estructura real del sistema nervioso; las polémicas y reacciones que su descubrimiento desencadenaron; en una palabra, incorporar asuntivamente a su propia formación ese complejo entramado de ciencia y vida que a través de las páginas de las *Recollections* palpita.

Junto al Cajal de este modo maestro, el Cajal guía: los estudiantes norteamericanos que en estos momentos proceden a su formación, harán bien no limitando ésta a la lectura de los textos hoy clásicos sobre las ciencias neurológicas; como M. Cowan apunta, el libro de Cajal les ofrece entonces un camino, no sólo material, sobre todo espiritual, para recorrer el período de su aprendizaje y ulterior trabajo con ese tesón y aquella firmeza que destilan sus páginas. Frente a los embates, frente a las incomprensiones de unos y otros, el mantenimiento de la verdad por encima de todos los avatares; y, lo que es más importante, la eficacia de esa actitud que la propia vida y la propia obra del sabio español ofrecen.

Y por fin, consecuencia de las anteriores posibilidades, Cajal ejemplo. A través de cuanto antecede se vislumbra, reiterativamente, esta tercera de la ejemplaridad. Para toda la comunidad investigadora, por supuesto, la figura de don Santiago Ramón y Cajal constituye alto ejemplo a imitar, un siglo después de su aventura: junto al tesón y a la firmeza ya aludidos, la modestia, la seguridad de que el entusiasmo puede suplir muchas veces la falta de medios, la certeza de que el trabajo permanente, huero del "pecado original de la recomendación", como el propio Cajal afirmara un día, puede más que todo frente a la consecución de la actividad científica proyectada.

Todo eso ofrecen a los investigadores y estudiantes norteamericanos las *Recollections of my Life* que ahora se les brindan de nuevo. Y para los españoles, con este libro en idioma extranjero, una vez más la posibilidad de soñar que sin el papanatismo del enclaustramiento patrio a ultranza aún puede ser posible, tras la formación más allá de las fronteras, un regreso a España para desde ella seguir incorporados a la gran rueda de la investigación científica universal. Aunque a veces lecturas como la biografía de Severo Ochoa nos despierten de tal sueño. Aunque a veces lecturas como los *Recuerdos* de Ramón y Cajal nos evoquen un "todavía". En esta mezcla buscada de la vida de dos premios Nobel me gustaría asumir estas reflexiones acerca de las memorias de Santiago Ramón y Cajal. (A. A.)

**QUÍMICA GENERAL EN CUESTIONES,** por Carmen García Gómez, Victoria Ramón Barzano, Isabel Carrascal Nieto, María Luisa Bañón León y Margarita Pérez Díaz. Addison-Wesley Iberoamericana España, S.A.; Madrid, 1990.

Este es un libro-útil, un libro-herramienta. Y es también un libro útil. Sus autoras han perseguido un objetivo concreto: suministrar un texto que permita al estudiante evaluar su capacidad de asimilación de los conceptos de química general, así como su facilidad de resolución de los problemas numéricos correspondientes.

Como indica su título, el libro consta de 544 cuestiones o problemas, con cuatro opciones de respuestas, de las cuales sólo una es la correcta. Están distribuidas en once capítulos temáticos. Estos son los más típicos de los programas de química general: estequiometría, termodinámica, estructura atómica y enlace, equilibrios físicos y químicos en disolución, equilibrio químico, cinética química y equilibrios de oxidación-reducción. Alguno de estos temas está dividido en varios capítulos por razones de extensión. De todas las cuestiones y problemas se da la solución al final del libro. No sólo se indica la opción correcta, sino que se comenta con detalle el procedimiento de solución, cuando no es evidente.

El conjunto sigue el estilo y contenido de la mayor parte de textos y temarios actuales de química general: hace especial énfasis en los temas estándar de la química física y elude todo contenido descriptivo. El nivel de las cuestiones y problemas es muy dispar, pero en conjunto es relativamente alto, y en ocasiones muy alto. Un ejemplo es el tema 2, "Termodinámica Química". Cuán satisfecho estaría el firmante si sus alumnos –de tercero de química, y que han cursado ya todo un curso de "termo"–, supieran responder correctamente la mayoría de sus 56 problemas... No obstante, el esfuerzo por aumentar el nivel de los contenidos es encomiable. En este sentido, me han interesado especialmente los capítulos 5 ("Estados de la materia") y 6 ("Disoluciones y sus propiedades. Diagramas de fase de dos componentes") que contienen diversas cuestiones y problemas imaginativos para la comprensión de los equilibrios físicos de sustancias puras y de sus mezclas binarias.

Desde el punto de vista pedagógico, el empleo de la técnica de cuestionario con opciones múltiples cerradas es adecuado en diversos casos, pero su utilidad como herramienta didáctica es cuestionable en otras ocasiones. Veamos un ejemplo: la cuestión 1.13 reza: "*Al analizar cierto compuesto, se encontró que 3,62 g de X estaban combinados con 0,571 g de carbono. Si una molécula del compuesto está formada por cuatro átomos de X y un átomo de carbono, ¿cuál será la masa atómica de X?* ***1.****– 76,0* ***2.****– 19,0* ***3.****– 24,8* ***4.****– 30,4*". Ante una pregunta así, ¿qué sentido tiene ofrecer cuatro opciones a escoger? El lector debe necesariamente efectuar cálculos, y las opciones presentadas no ofrecen ninguna "pista" orientativa ni permiten discusión sobre las mismas. En problemas numéricos de este estilo esta técnica de opción múl-

tiple no es adecuada, y el libro se transforma en una mera colección de problemas resueltos. Hay muchas –demasiadas– cuestiones de este cariz.

Pasemos a algunas críticas concretas. Es cuestionable la necesidad de seguir usando conceptos que tienden a irse eliminando de los textos modernos, como "equivalente", "átomo-gramo", o "molalidad". Más sorprendente es el empleo de las expresiones $^{0-1}$ o grado$^{-1}$, por $K^{-1}$, teniendo en cuenta que el Sistema Internacional de unidades es el aplicado en el libro, casi siempre con precisión. En el capítulo 7 se utiliza el concepto de "transcurso de la reacción" para indicar lo que en otros libros se conoce como "coordenada de reacción", "camino de reacción" y parecidos. Tales términos –que nunca ningún texto sabe definir cuantitativamente– deberían desaparecer ya de una vez de los libros, puesto que la representación gráfica en la que aparecen es sólo un diagrama energético con sentido en las ordenadas pero no en la abscisa. Es imperdonable el empleo de "reglas de tres" en diversos problemas –empezando por el 1.1–, cuando es mucho más claro y correcto el uso de factores de conversión.

El libro finaliza con unos cortos –y poco cuidados– apéndices con valores numéricos que deben emplearse en algunos problemas. El apéndice A16, con equivalencias entre unidades, es demasiado corto (sólo 10 valores) y trivial.

La química general, asignatura tan discutida –y discutible– de los planes de estudios de los primeros ciclos de carreras de ciencias y técnicas, puede verse sometida a profundos cambios con la reforma de las enseñanzas en que está envuelta la Universidad en la actualidad. No obstante, con este u otro nombre, el contenido de sus temas es incuestionable, e imprescindible, y una aportación a su mejor comprensión por parte de los alumnos, como el libro que se comenta, debe ser bienvenida.

En el prólogo del libro se indica que "puede ser de utilidad para los alumnos de preuniversitario, puesto que el temario y el nivel son suficientemente básicos". Esta afirmación es excesivamente optimista, creo, para la mayor parte del contenido. En cambio, será un texto útil para profesores y estudiantes universitarios, su mercado natural. (C. M.)

**MOLECULAR BIOLOGY OF THE CELL. PROBLEMS BOOK,** por John Wilson y Tim Hunt. Garland Publishing, Inc., Nueva York, 1989.

Cuando en 1983 se publicó la primera edición de *Molecular Biology of the Cell*, un auténtico "best-seller" de la literatura científica en este área, algunos pudimos pensar que no tardaría en quedar algo desfasado, dado el extraordinario volumen de trabajos que anualmente se recogen en las revistas científicas. Ciertamente, poco tiempo hemos tenido para mantener este pensamiento ya que en 1989 se ha publicado la segunda edición, convenientemente actualizada, y con la importante novedad de ir acompañada de un libro de problemas con las respuestas al final del mismo.

*Problems Book* sale a la luz escrito por J. Wilson y T. Hunt, autores diferentes de los del texto, si bien evidencian un conocimiento perfecto tanto del texto como de los objetivos de los autores. Contiene cuestiones y problemas, referentes a los capítulos cinco al catorce del *Molecular Biology of the Cell*, de tres tipos: cuestiones de rellenar espacios en blanco en determinadas frases, cuestiones de verdadero o falso y problemas que giran alrededor de la experimentación en el área de la biología molecular de la célula.

Cabe destacar, en primer lugar, la adecuada proporción de unas cuestiones y otras, tanto entre los distintos capítulos como entre los diferentes apartados de cada capítulo. Asimismo, es de hacer notar la variedad de las cuestiones planteadas, en las que no faltan las relativas al buen entendimiento de las técnicas que se emplean en los diversos campos de la biología molecular y el correcto manejo de los cálculos matemáticos, tan necesarios en la biología moderna. Muchos de los problemas van acompañados de referencias bibliográficas para la resolución y comprensión de la respuesta.

Los dos primeros tipos de preguntas se han utilizado frecuentemente como modelos de las llamadas pruebas objetivas de evaluación de los conocimientos adquiridos por los estudiantes. En el primer caso están seleccionados los datos, nombres, etcétera, de mayor interés que conviene retener. Las cuestiones de verdadero o falso están planteadas para "forzar" al lector a pensar, ya que debe argumentar el porqué de las aseveraciones que considere falsas.

Sin quitar importancia a estos dos primeros tipos de preguntas, considero que la mayor novedad del libro está en el tercer tipo de problemas, ya que en ellos se introduce al lector en las cuestiones experimentales, a la vez que se le ayuda a plantearse él dichas cuestiones, convirtiendo al estudiante en investigador en potencia. Los problemas están escritos con el lenguaje riguroso que requiere el saber científico, pero a la vez de forma muy sugestiva. Dada la falta de motivación que a veces se observa entre los alumnos, el ropaje lingüístico con el que se plantean estas cuestiones resulta el más adecuado para la formación de futuros investigadores.

En algunos capítulos, tales como el de los mecanismos genéticos básicos, parece relativamente sencillo confeccionar problemas de este tipo, pero resulta sorprendente la capacidad integradora de los autores al plantear problemas en temas, como el de uniones de membrana, en los que tradicionalmente se ha hecho mayor hincapié en aspectos morfológicos. Ciertamente, estos problemas, en general, no son fáciles y su solución rebasa las posibilidades del lector acostumbrado a un aprendizaje memorístico y no al ejercicio del pensamiento en el estudio. Puede que ante algunas de las cuestiones nos veamos sorprendidos, incluso los que nos dedicamos a enseñar a pensar en este área. Particular sorpresa nos pueden producir los problemas sin respuesta, que son un desafío para profesores y estudiantes, pudiendo ser objeto de sesiones de discusión dirigida, trabajo en grupo, seminarios, etcétera. Parece que los autores se han reservado pequeñas parcelas al objeto de estimular todavía más al lector, impulsándole a la adquisición –si se puede hablar así– de una mentalidad celular para la comprensión integral de la biología molecular.

En el pequeño folleto de divulgación del libro se recogen algunas opiniones de estudiantes a través de las cuales manifiestan la gran ayuda que supone para comprender el texto y para preparar la prueba final. Estoy segura de que los resultados en un examen de estas características serían, asimismo, una buena evaluación del modo de enseñar del profesor y del espíritu científico que ha conseguido despertar en sus alumnos.

No quisiera omitir un pequeño comentario a la larga lista de agradecimientos que, una vez leída, en un primer impulso, puede producir la impresión –falsa– de que los autores apenas han hecho nada para que el libro vea la luz. En esta lista figuran los estudiantes –a quienes está dedicado el libro– que son el objetivo prioritario del mismo.

Terminamos este comentario con una pregunta que expresa un deseo. ¿Saldrán en la siguiente edición los

problemas relativos al de los capítulos restantes? Esperamos que así sea, pero mientras tanto comencemos nosotros a formularnos y a intentar que se planteen nuestros alumnos las preguntas que, seguramente, el estudio paralelo del texto y el libro de problemas harán aflorar en nuestro pensamiento, ya que ambos constituyen una excelente herramienta de trabajo en un curso de biología celular. (P. S.)

**Las iras de la Tierra,** por Claude Allègre. Alianza Editorial; Madrid, 1989.

Destinado al gran público, este libro presenta una visión simplificada de las dos catástrofes geológicas más importantes, los terremotos y las erupciones volcánicas. Su autor Claude Allègre, geoquímico, por su formación está más relacionado con el fenómeno volcánico, pero su cargo de director del Instituto de Física del Globo de París durante 10 años le ha puesto en contacto con una variedad de problemas geofísicos, entre ellos de manera prominente con el riesgo de los terremotos. Sin embargo, su propia formación hace que en este libro la parte relacionada con los volcanes esté mejor desarrollada que la que trata de los terremotos. El libro, que podemos catalogar de divulgación científica, está destinado al público general, no especializado, y en concreto al público francés. Este último extremo repercute en los ejemplos que toma tanto de terremotos como de volcanes que se refieren a fenómenos en territorio francés o de sus colonias. Por ejemplo, alude en particular a los volcanes de las islas Martinica y Guadalupe y a la sismicidad de Francia. Esta es una pequeña limitación, al presentar su traducción al público español, ya que no se mencionan los terremotos de España que hubieran sido de más interés. El único terremoto español del que se hace referencia es el terremoto profundo del sur de España que tuvo lugar el 29 de marzo de 1954, y que en el libro se sitúa en 1973. Esta limitación es aún mucho mayor si se piensa en lectores de Latinoamérica donde la actividad sísmica y volcánica es muy intensa y de la que apenas se hace mención. La elección del libro para su edición española no es por lo tanto muy adecuada, y debería haberse pensado en un libro escrito por un experto español.

El libro toca los temas de más interés sobre estos dos fenómenos, terremotos y erupciones volcánicas, de una forma adecuada al público no especializado, abundando en los aspectos de mayor repercusión, como son los daños que producen, la evaluación del riesgo, su predicción y prevención y las repercusiones sociales. Un primer capítulo sobre la estructura de la Tierra y la tectónica de placas sirve para enmarcar la situación y naturaleza de las zonas activas tanto de terremotos como de volcanes. El capítulo sobre terremotos presenta de forma muy sucinta la naturaleza y características de estos fenómenos, su observación y la determinación de su localización, tamaño y mecanismo. En este apartado se presenta una interpretación un tanto discutible del fenómeno de ruptura de una falla, comparándola a una explosión, que difícilmente será comprendido por los lectores. El capítulo dedicado a explicar el fenómeno volcánico está mejor desarrollado explicando las fases de una erupción, sus diferentes clases e ilustrado con varios ejemplos. En ambos capítulos las figuras, aunque sencillas, son muy ilustrativas.

El capítulo destinado a la predicción tanto de terremotos como de volcanes es de particular interés y está desarrollado. Las limitaciones de los métodos actuales están bien planteadas. Así como en el caso de los terremotos queda claro que aún se está lejos de poder hacer predicciones con un grado suficiente de fiabilidad, en el de los volcanes éstas son posibles cuando se dispone de una red de vigilancia suficientemente desarrollada. El autor hace una llamada de atención a que se disponga de tales redes en los volcanes activos cuyas erupciones pueden afectar a núcleos de población. Menos popularidad que la predicción de las catástrofes tiene el problema de la prevención de los daños. El autor hace hincapié en este aspecto, comenzando con la necesidad de evaluar la importancia del riesgo, tanto de terremotos como de erupciones volcánicas, y las medidas encaminadas a la disminución de los daños.

El último capítulo está destinado a las consecuencias sociales de estas catástrofes y al papel que en ellas desempeñan tanto los políticos como los medios de comunicación. Partiendo de su experiencia personal en el caso de la crisis volcánica de Guadalupe en 1976, saca importantes consecuencias sobre el modo en que debe actuarse en estos casos con respecto a la administración pública y a los periódicos. Esta experiencia negativa sirvió para que en 1977 en la isla de San Vicente se tomasen medidas oportunas sobre la relación entre científicos y periodistas. Este tema es importante ya que cada vez más los periódicos toman cartas rápidamente sobre problemas científicos y los científicos buscan la publicidad que la prensa les otorga, sacrificando a veces el rigor, como se vio en el caso ya casi olvidado de la fusión fría. (A. U.)

**Prospects in systematics.** Dirigido por D. L. Hawksworth. Clarendon Press; Oxford, 1988. **Histoire du concept d'espece dans les sciences de la vie,** por Scott Atran *et alii*. Fondation Singer-Polignac; París, 1987.

He aquí dos libros importantes sobre teoría de la sistemática y clasificación en las ciencias biológicas. Ambos recogen las conferencias de sendos congresos internacionales, el primero para conmemorar las bodas de oro de la Systematics Association y el segundo, auspiciado por una fundación privada, para abordar la noción de especie a lo largo de la historia. La especie es la unidad fundamental de la sistemática, como lo es de la evolución.

El editor lugdunense de la linneana *Methodica dispositio animalium specierum* escribía ya en 1759 que cada autor tiene su propia sistemática y cada día nace una nueva. (Corrían libros, mediados el XVIII, con cuadros esquemáticos para clasificar, no sólo las especies o los géneros, sino también los autores de distintas propuestas o criterios.) En ese telar de Penélope estamos y se sigue disertando sobre la clasificación de las clasificaciones que se ofrecen para explicar la evolución y el parentesco de los organismos. Métodos hay que, atentos a la onda imperante, se pueden adquirir a un precio módico sustanciados en programas de ordenador que llevan por título PAUP (de "Phylogenetic Analysis Using Parsimony"), PHYLIP ("Phylogeny Inference Package"), PHYSYS ("Philogenetic Analysis System") y varios más en número no pequeño, como el sugestivo EVOLVE.

Empero, esa silva puede resumirse en tres grandes escuelas, la cladística, la fenética y la clásica, con jefes de fila en Hennig, Sneath y Mayr. Las relaciones entre unas y otras no son forzosamente amigables; en el mejor de los casos, se consideran complementarias. Así se expresa, por ejemplo en el primer libro, Mayr: "Aunque el enfoque fenético cuenta todavía con buen número de seguidores, me parece que puede decirse que la mayoría de los taxónomos se hallan tan confundidos ante sus limitaciones, limitaciones que no tengo tiempo de exponer, que han encaminado sus pasos por una de las dos escuelas res-

tantes" (p. 37). Sentencia de Mayr que la mayoría no comparte, obviamente, por la razón no menos sólida del impulso que ha recibido la sistemática desde ese flanco que él ve desguarnecido. Sneath se muestra, por contra, conciliador con los cladistas y cree que sus análisis numéricos pueden servir de punto de partida para la creación de clados filogenéticos (p. 252-273). Idea ésta que muy pocos rechazarán.

La causa de tanta divergencia radica en el concepto de especie, de múltiple significado según estemos en zoología, botánica, paleontología o microbiología. En todo caso, la clasificación pretende siempre medir la homología de caracteres: hasta qué punto concuerdan dos especies, dos géneros, dos órdenes, etcétera. En la medición comparativa de frecuencias y homologías insisten los fenetistas, que han creado modelos muy potentes para enclaustrar las semejanzas. A los cladistas les importa sobre todo crear árboles filogenéticos, es decir, acotar los caracteres que van persistiendo en taxones de rango cada vez superior, sin prestar especial atención a los que se presentan, por mutación, recombinación o cualquier otro mecanismo evolutivo, en el curso de la historia. Los clásicos afirman que a la hora de acotar un grupo deben sopesarse o cribarse los caracteres (no todos tienen igual valor predictivo), contra la tendencia niveladora que exige el tratamiento numérico de los fenetistas; y deben tomarse en consideración los rasgos evolucionados, frente a los cladistas. Son, creo, cuestiones de matices, que la genética del futuro, en la que todos esperan para dirimir la cuestión, resolverá.

*Prospects in Systematics* recoge los esfuerzos que en esos frentes se están desplegando. Se le sintetiza al lector el estado de la cuestión que, por separado –o por escuelas–, podrá encontrar en otros empeños parciales. (Véase, por ejemplo, *Numerical Taxonomy*, espléndido volumen dirigido por J. Felsenstein y publicado en 1983, con un aparato matemático que en *Prospects* falta. O consúltense las actas del Congreso Botánico Internacional de Berlín, de 1987, dedicado a la teoría y la práctica de la clasificación en este dominio.) El punto de referencia es aquí el congreso fundacional de la Systematics Association, así como el fruto de aquel simposio: *The New Systematics*, que preparó Julian Huxley. Era nueva, con respecto a la sistemática tipológica o morfológica precedente, al incorporar los progresos en genética y citología (el criterio cromosómico) y los factores ambientales o ecológicos (tipos de especiación simpátrica y alopátrica). Las conferencias publicadas en *Prospects* augurarían, en la voluntad de sus convocantes, una "novísima sistemática".

Haksworth articula las colaboraciones en seis partes. Una primera o introductoria relata la historia de la asociación y destaca la importancia de la sistemática en la biología y la sociedad contemporánea, plantea el desarrollo reciente de la disciplina y expone la estructura de la misma... y sus limitaciones: hasta el día de hoy no existe unanimidad en definir qué criterios son los óptimos para una clasificación ni en acotar si las taxonomías deben ser un espejo de lo que existe y existió en la naturaleza o bien un instrumento más o menos válido, una suerte de mapa a escala racional para abrirnos paso en ese territorio.

Dos ejes de coordenadas cartesianas debe trazar cualquier método que se diseñe. En el de ordenadas, se establece la presumible relación de ancestro-descendiente, y entrará aquí la segunda parte, sobre sistemática y evolución, con artículos concernientes al influjo de las teorías evolutivas en la sistemática, el concepto de especie y de especiación, detección de la filogenia y aportación de la paleontología.

En el eje de abscisas hemos de anotar las distancias –semejanzas, afinidades o discrepancias– entre grupos. En el paso de gigante que se ha dado en este campo están puestas las esperanzas de que, en el futuro, se haga la luz y deje la sistemática de ser el patio de vecindad como muchos biólogos la miran todavía despectivamente. Nos referimos a la tercera y cuarta partes, que podemos sintetizar en técnicas genéticas, de determinación de homologías entre ácidos nucleicos o entre proteínas, rastreo del alosterismo enzimático, técnicas microscopistas y algoritmos matemáticos. La quinta parte se abre a las aplicaciones de la sistemática; la sexta resume las expectativas de futuro.

Quizá, para ayudar al estudiante que se acerca a esa ciencia, ¿o arte?, si no para completar el cabal esquema de las ponencias, hubiera sido necesario incluir algunas contribuciones sobre relojes moleculares, el principio de parsimonia e incluso la hipótesis de la reina roja (esbozada para explicar la tasa de extinción). Temas que aparecen, casi siempre, de refilón y fácilmente se atisba, sin embargo, su importancia decisiva. También ayudaría añadir un diccionario de palabras clave con los distintos significados según las escuelas o los autores: rango, taxón, microtaxonomía, clase, clado, sinapomorfía, convergencia, parafilia, homofilético, etcétera.

Algunos términos, evidentemente, dan para un libro, cuando no han hecho ya correr ríos de tinta. *Histoire du concept d'espèce dans les sciences de la vie* se sale, no obstante, de la corriente común. Quince comunicaciones se proponen abarcar desde la noción intuitiva de los pueblos primitivos que dividen, nombran, las plantas y animales que les sirven de alimento, abrigo o medicina, hasta la situación actual, expuesta, también aquí, por Mayr.

Destacaría, para empezar, el escrito de Pierre Louis, "La notion d'espèce dans la biologie d'Aristote". No aporta nada que no supiéramos ya, pero la nitidez de su exposición es meridiana, con la mesura de quien quintaesencia muchísimos años de trato familiar con el estagirita. En una línea completamente distinta, Phillip R. Sloan, "From logical universals to historical individuals: Buffon's ideas of biological species", enmarca, en la emergencia de la teoría probabilística de los matemáticos ginebrinos, los hermanos Bernoulli, y en la del cálculo infinitesimal de la disputa Newton-Leibniz, la aparición del concepto de especie ante su sempiterno enfrentamiento con el mundo de la abstracción y con el de la realidad encarnada en los individuos, es decir, con los universales lógicos y las entidades singulares del mundo real.

Vale la pena leer el artículo de Richard W. Burkhardt, si queremos borrar de una vez los resúmenes falaces de muchos compendios a propósito de Lamarck: ni la *Philosophie zoologique* ni ninguno de sus grandes tratados deben entenderse como obras sobre el origen de las especies. Pero más que esta conclusión, compartida y adelantada por otros, o la queja de que pocos historiadores han manejado la *Histoire naturelle des animaux sans vertèbres*, tan repetidamente invocada, lo que importa resaltar es la evolución del transformista y el estado de la cuestión en su entorno inmediato. Objetivo que se cumple en sendos análisis sobre Réamur y Bonnet. Cerrados los demás capítulos de la obra, de excelente nivel, se queda uno con la impresión de que faltan muchos caminos por roturar. Algunos parecen querer cubrirse a última hora y con una cita larga (me refiero a la biología medieval). Sepa, al menos, el lector que lo que se le ofrece no es desdeñable, en un dominio donde la cantidad no suele ir de la mano de la calidad o de la imaginación innovadora. (L. A.)

# Apuntes

De entre las sustancias farmacológicamente activas que tienen uso clínico, unas 120 provienen de plantas superiores, habiendo dado la pista para su localización la farmacopea tradicional en un 75% de los casos. Aunque esta búsqueda lleva realizándose sistemáticamente más de un siglo, se estima que sólo se han estudiado a fondo unas 5000 especies de plantas, de un total, también estimado, de doscientas cincuenta a trescientas mil especies. Japón y Alemania Federal son los países pioneros en esta investigación. En Estados Unidos se están poniendo en marcha métodos de prueba más eficaces, con vistas a detectar sustancias activas contra las distintas formas de cáncer al ritmo de unas 20.000 substancias al año, tanto naturales como de síntesis.

Aunque se siga discutiendo si la causa es el efecto invernadero, de lo que no cabe duda es de que la tendencia alcista de la temperatura global de nuestro planeta, iniciada a mediados de los años setenta, se mantiene firme: 1989 ocupó el quinto puesto en la clasificación de año más cálido, de entre los 134 que se han registrado.

Hace pocos años, se inició la terapia de la enfermedad de Parkinson mediante implantes de tejidos en el cerebro de los pacientes, con resultados poco concluyentes. El grupo que trabajaba en el Hospital de Especialidades Médicas ''La Raza'', de la ciudad de México, usaba tejido de las glándulas suprarrenales del propio paciente, mientras que un grupo sueco usaba tejido nervioso fetal. Este último método es el que parece más prometedor, porque las nuevas células sobreviven en el receptor y, en un caso bien estudiado, se ha comprobado una mejora importante del paciente, aunque en modo alguno pueda considerarse una terapia establecida. Además, la obtención del tejido fetal para el trasplante presenta numerosos problemas éticos, sociales y legales, y se encuentra prohibida por la legislación de varios países.

Una nueva duda y un nuevo estímulo para la búsqueda intelectual: es posible que existan fotones que viajen a velocidad superior a la de la luz. Esto pondría en un brete a uno de los axiomas fundamentales de la física y el pensamiento contemporáneos, la famosa constante *c* einsteiniana. Scharnhost y Barton han sugerido tal posibilidad, al darle vueltas al ''etéreo'' tema de la naturaleza del vacío desde el punto de vista de la electrodinámica cuántica. La estructura del vacío podría determinar la velocidad de la luz.

El bambú es planta bien conocida por su belleza y por ser alimento de los osos panda. Menos conocidas pueden ser sus flores, ya que cada planta sólo florece una vez, lo hace de forma impredecible dentro de un período de entre 12 y 120 años y, además, en sintonía con las que la rodean. El cultivo del bambú se ha mostrado extraordinariamente difícil hasta ahora, cuando investigadores del National Chemical Laboratory de India han logrado cultivos de laboratorio en los que han podido controlar sistemáticamente la floración de dos especies de bambú.

Ojo clínico se llama a esa facultad: la que tienen las hembras de *Gasterosterus aculeatus*, más conocido por espinoso, para seleccionar a su pareja de acuerdo con su estado de salud. La intensidad de la coloración rojiza de los machos en la época de cría está positivamente relacionada con su forma física. La verdad es que lo tienen fácil.

La reunificación de la ciencia alemana comienza a andar. El primer paso lo ha dado la Sociedad de Física, una de las instituciones europeas de mayor prestigio hasta la segunda guerra mundial. De la conjunción de esfuerzos se espera un profundo avance en física del estado sólido, investigación en polímeros y física atmosférica.

S. Chandrasekhar, premio Nobel de física, invita a la meditación, en un libro reciente (*Truth and Beauty: Aesthetics and Motivations in Science*, ''Verdad y Belleza: Estética e Intereses en la Ciencia''), sobre tres cuestiones relacionadas: el aspecto de la naturaleza que resulta más incomprensible, los fines que a uno le guían en la búsqueda del conocimiento y las fuentes de la satisfacción propia en ese empeño. A propósito de la última cuestión, reminiscente de la vieja teoría aristotélica sobre el placer máximo escondido en la luz intelectual, deja su respuesta en otra pregunta, ahora de T. S. Eliot: ''¿No es extraño que el hombre sienta una pasión consuntiva por realizar algo para lo que carece de capacidad suficiente?''

# *Seguiremos explorando los campos del conocimiento*




**DEFORESTACION DE LOS TROPICOS, por Robert Repetto**
*Las políticas de los gobiernos que impulsan la explotación –en particular la corta excesiva y el aclareo para construir ranchos– son responsables de la destrucción acelerada de los bosques tropicales.*

**LO QUE EL CEREBRO INFORMA AL OJO, por Robert B. Barlow, Jr.**
*Un reloj circadiano ajusta la sensibilidad de las Molucas. El estudio del mecanismo implicado abre la vía que lleva al conocimiento del control cerebral sobre los órganos sensoriales en otros animales.*

**ORIGEN INSOLITO DE LA REACCION EN CADENA DE LA POLIMERASA, por Kary B. Mullis**
*Un método de sorprente sencillez para fabricar copias de fragmentos de ADN sin límite se ideó en circunstancias inverosímiles, durante un viaje, a la luz de la luna, a través de las montañas de California.*

**FORMACION DE CRATERES DE IMPACTO EN LA TIERRA, por Richard A. F. Grieve**
*La explosión de todo el arsenal nuclear mundial quizá no supere la energía que se libera cuando un meteorito de un kilómetro de diámetro cae sobre la Tierra. ¿Pueden impactos más intensos haber alterado la evolución biológica y geológica?*

**LOS MITOS CLASICOS, por Carlos García Gual**
*Relatos tradicionales que perviven en la memoria colectiva, los mitos, protagonizados por dioses y héroes, explican el mundo. En Grecia los poetas fueron los guardianes de la mitología, a la par religiosa y literaria.*

**ESMALTES ANTIGUOS, por Pamela B. Vandiver**
*La belleza de una cerámica esmaltada se consigue mediante la interacción de la luz con la compleja estructura del esmalte. Los métodos de la ciencia de materiales revelan el ingenio de las viejas técnicas de esmaltado.*

**¿QUE ESTA OCURRIENDO EN EL CENTRO DE NUESTRA GALAXIA, por Charles H. Townes y Reinhard Genzel**
*La misteriosa región contiene antimateria, nubes radiactivas, veladas fuentes de intensa radiación, gas y polvo en rotación turbulenta y un invisible objeto con una ingente atracción gravitatoria: tal vez un agujero negro de enorme masa.*

**REACTORES NUCLEARES AVANZADOS DE AGUA LIGERA, por Michael W. Golay y Neil E. Todreas**
*Los nuevos diseños en los que se introducen medidas de seguridad "pasivas" pueden hacer más atractiva la energía nuclear, a condición de que se atiendan los factores económicos, la gestión eficaz y el adiestramiento de los empleados.*

